

DISEÑO DE PROTOTIPO GEOMÉTRICO EN RETICULADOS ESPACIALES EN BAMBÚ CHASQUEA CARRIZOS

APLICACIÓN A FERIAS ITINERANTES EN ESPACIO PÚBLICO.

Hilen Camila Bonilla Gómez



Arquitectura, Facultad Arquitectura

Universidad

Ciudad

2024

**DISEÑO DE PROTOTIPO GEOMÉTRICO EN RETICULADOS ESPACIALES EN BAMBÚ CHASQUEA CARRIZOS
APLICACION A FERIAS ITINERANTES EN ESPACIO PÚBLICO.**

Hilen Camila Bonilla Gómez

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de Arquitecto

Manuel Fernando Martínez Forero



UNIVERSIDAD
La Gran Colombia

Vigilada MINEDUCACIÓN

Arquitectura, Facultad Arquitectura

Universidad

Ciudad

2024

Tabla de contenido

TABLA DE CONTENIDO	3
GLOSARIO	8
RESUMEN	10
ABSTRACT	11
INTRODUCCIÓN	13
HIPÓTESIS	14
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
JUSTIFICACIÓN	18
OBJETIVOS	20
OBJETIVO GENERAL	20
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
1 MARCO DE LA INVESTIGACIÓN	21
1.1 ANTECEDENTES	21
1.1.1 <i>Evolución Histórica de los Sistemas Reticulados</i>	21
1.1.2 <i>Aplicaciones Contemporáneas de los Reticulados Espaciales</i>	24
1.2 EXPLORACIÓN DE LAS GEOMETRÍAS MININAS.	25
1.2.1 <i>Teorías geométricas</i>	26
1.2.2 <i>Geometría del tetraedro con SAM</i>	28
1.3 APLICACIÓN DE GEOMETRÍAS MÍNIMAS EN RETICULADOS ESPACIALES.....	29
1.3.1 <i>Clasificación de sistemas reticulares</i>	32
1.3.2 <i>Comportamientos estructurales</i>	34
1.4 FUNDAMENTO DE APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS RETICULADOS.....	35
1.4.1 <i>Desarrollos existentes de cubiertas de reticulares</i>	37
1.4.2 <i>Aplicaciones en la Arquitectura Urbana</i>	39

1.4.3	<i>Casos de estudio</i>	40
1.5	DESARROLLO DE LOS NODOS EN SISTEMAS RETICULADOS	41
1.5.1	<i>Evolución y Clasificación de Nodos</i>	41
1.5.2	<i>Sistemas patentados de Nodos</i>	43
1.5.3	<i>Desarrollo de Nodos en Reticulados Espaciales con Bambú</i>	43
1.6	MATERIALIDAD DE BAMBÚ.....	44
1.6.1	<i>Especie chusquea</i>	45
1.6.2	<i>Propiedades de Bambú Chasquea</i>	46
1.6.3	<i>Procesos de Tratamiento y Secado</i>	47
1.6.4	<i>Aplicación de Bambú Chasquea en sistemas reticulados</i>	48
2	ASPECTOS METODOLÓGICOS	49
2.1	TIPO DE INVESTIGACIÓN	49
2.2	NIVELES DE INVESTIGACIÓN.....	50
2.3	FASES DE INVESTIGACIÓN.....	51
3	PROPUESTA	53
3.1	DISEÑO CONCEPTUAL DEL PROTOTIPO	53
3.1.1	<i>Principios de Diseño Geométrico</i>	53
3.1.2	<i>Morfología geométrica</i>	54
3.2	DESARROLLO DE MODELOS DIGITALES	58
3.2.1	<i>Herramientas de Modelado Utilizadas</i>	58
3.2.2	<i>Modelaciones de software paramétrico</i>	59
3.2.3	<i>Simulación de Comportamiento Estructural</i>	63
3.2.4	<i>Optimización Geométrica y Estructural</i>	65
3.3	CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPOS A ESCALA	67
3.3.1	<i>Procedimiento de Diseño y Fabricación de Uniones</i>	67

3.3.2	<i>Materiales y Técnicas de Ensamblaje</i>	78
4	CANTIDADES PARA EL ENSAMBLE DE TODA LA ESTRUCTURA	84
5	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	86
6	CONCLUSIONES	88
	LISTA DE REFERENCIA O BIBLIOGRAFÍA	89
7	REFERENCIAS	89
	ANEXOS ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	

Lista de imágenes

<i>Imagen 1 Manual de estructuras Francis D. K. Ching</i>	<i>23</i>
<i>Imagen 2 Detalle de caminos rápido en películas de jabón.....</i>	<i>27</i>
<i>Imagen 3 Pabellón de Alemania en Montreal</i>	<i>28</i>
<i>Imagen 4 SAM en la geometría de tetraedro</i>	<i>29</i>
<i>Imagen 5 Gran variedad de perfiles.....</i>	<i>31</i>
<i>Imagen 6 Clasificación de los sistemas reticulados espaciales.</i>	<i>33</i>
<i>Imagen 7 Tipología de apoyos</i>	<i>35</i>
<i>Imagen 8 Cubierta modula - Concurso Idearte</i>	<i>38</i>
<i>Imagen 9 Adecuación orgánica estructura.</i>	<i>39</i>
<i>Imagen 10 Morfología de Bambú</i>	<i>45</i>
<i>Imagen 11 Principios de diseño geométrico</i>	<i>54</i>
<i>Imagen 12 Optimización Geométrica y Estructural</i>	<i>62</i>
<i>Imagen 13 Modelación para impresión 3D.....</i>	<i>63</i>
<i>Imagen 14 Simulación Robot estructural.....</i>	<i>64</i>
<i>Imagen 15 Comportamiento estructural del supermódulo.....</i>	<i>66</i>
<i>Imagen 16 Ensamble unión y barra de Bambú</i>	<i>70</i>
<i>Imagen 17 Prototipo inicial.....</i>	<i>71</i>
<i>Imagen 18 Modelado de unión en varilla</i>	<i>72</i>
<i>Imagen 19 Soldador TIC.....</i>	<i>73</i>
<i>Imagen 20 Unión metálica con barra de Bambú</i>	<i>74</i>
<i>Imagen 21 Plantilla trabajo para unión de lámina metálica</i>	<i>75</i>
<i>Imagen 22 Unión de lámina metálica</i>	<i>76</i>
<i>Imagen 23 Plantilla final para corte de la lamina.....</i>	<i>77</i>
<i>Imagen 24 Ensamble de unión de impresión 3D con un Supermódulo</i>	<i>79</i>
<i>Imagen 25 Ensamble de unión de LAMINA y VARILLA con un Supermódulo</i>	<i>80</i>

<i>Imagen 26 Ensamblé de estructura reticular</i>	<i>82</i>
<i>Imagen 27 Ensamblé de un modulo.....</i>	<i>84</i>

Lista de Tablas

<i>Tabla 1 Propiedades de Bambú Chasquea.....</i>	<i>47</i>
---	-----------

Glosario

Hiperestaticidad: Los elementos de la estructura están en equilibrio, pero las ecuaciones de la estática no son suficientes para determinar las fuerzas internas, por lo que se requieren métodos adicionales para garantizar la estabilidad estructural.

Armadura tridimensional: Configuración formada por figuras bidimensionales a las que se añaden más barras para crear una estructura espacial, permitiendo distribuir cargas en varias direcciones.

Modelado paramétrico: Diseño asistido por computadora que permite crear geometrías complejas ajustables a través de parámetros específicos, facilitando la personalización y eficiencia en las estructuras.

Momento flector: Esfuerzo interno generado por cargas transversales que tiende a curvar un elemento. Es importante minimizar este esfuerzo en estructuras reticuladas.

Fatiga estructural: Deterioro que sufre un material sometido a ciclos repetidos de carga, lo que puede llevar a fallos estructurales, especialmente en estructuras temporales.

Geometría mínima: Diseño estructural que utiliza la cantidad mínima de material necesaria para cumplir con los requisitos de carga y estabilidad.

Supermodelo: Conjunto de módulos base repetidos que generan configuraciones geométricas complejas, aumentando la capacidad de carga y estabilidad de la estructura.

Autosoportante: Estructura que puede mantenerse de pie sin soportes adicionales, gracias a su configuración geométrica optimizada.

Cubierta textil tensada: Membrana flexible utilizada para cubrir estructuras reticuladas, distribuida uniformemente mediante tensores, ofreciendo ligereza y protección climática.

Estructuras no convencionales: Estructuras que rompen con los diseños tradicionales, empleando geometrías innovadoras y materiales no convencionales para nuevas soluciones estéticas y funcionales.

Estructuras itinerantes: Estructuras diseñadas para ser móviles o temporales, que se ensamblan y desmontan fácilmente, con capacidad de ser trasladadas a distintas ubicaciones.

Bambú Chusquea Carrizo: Material natural con alta resistencia a la compresión y tracción, ideal para su uso en sistemas reticulados espaciales y estructuras sostenibles.

Modularidad: Característica que permite ensamblar componentes repetidos de una estructura, facilitando su transporte, montaje y desmontaje.

Resumen

Este estudio investiga la aplicación de un nuevo cuerpo geométrico derivado de la geometría del tetraedro, adaptado en forma de arco y empleado en sistemas reticulados espaciales a menor escala para la creación de estructuras temporales en espacios culturales. Se enfoca en tres aspectos clave: la exploración de geometrías basadas en el tetraedro, el desarrollo de uniones estandarizadas y paramétricas para elementos de bambú, y su aplicación práctica en escenarios itinerantes, como ferias urbanas emergentes. El objetivo es diseñar una estructura liviana, resistente, estable y fácilmente transportable, que optimice el montaje y desmontaje, adaptándose a eventos temporales en espacios públicos.

El proceso de investigación incluyó una revisión exhaustiva de los sistemas reticulados espaciales y un análisis detallado de las propiedades físicas y mecánicas del bambú *Chusquea Carrizo*. Utilizando herramientas de modelación paramétrica, se crearon prototipos iterativos que exploraron diversas configuraciones geométricas. Además, se incorporaron técnicas de fabricación avanzadas, como la impresión 3D y la fabricación de uniones metálicas, tanto en varillas de acero soldado como en láminas metálicas, lo que optimizó la resistencia y permitió asegurar una modulación eficiente en el ensamblaje. Estas uniones fueron diseñadas para facilitar el montaje rápido y preciso, maximizando la estabilidad de la estructura sin comprometer su ligereza y adaptabilidad.

Los resultados destacan la viabilidad y eficiencia del sistema propuesto, que combina la optimización geométrica y la utilización de materiales sostenibles como el bambú. Este enfoque permite una mayor versatilidad en el diseño arquitectónico, ofreciendo soluciones livianas y resistentes que se adaptan a las demandas del urbanismo emergente. La implementación de uniones estandarizadas, con elementos en varilla y lámina metálica, mejora la estabilidad y durabilidad, minimizando el impacto ambiental y asegurando un montaje ágil y efectivo en espacios públicos temporales.

Palabras clave: *Estructuras itinerantes, Sistema de reticulados espaciales, Estructuras intermitentes, Armadura tridimensional, Estructuras no convencionales*

Abstract

This study investigates the application of a new geometric form derived from the tetrahedron, adapted into an arch shape, and employed in smaller-scale spatial lattice systems for the creation of temporary structures in cultural spaces. It focuses on three key aspects: the exploration of tetrahedron-based geometries, the development of standardized and parametric joints for bamboo elements, and their practical application in itinerant scenarios such as emerging urban fairs. The objective is to design a lightweight, resistant, and stable structure that is easily transportable, optimizing assembly and disassembly, and adaptable to temporary events in public spaces.

The research process included a comprehensive review of spatial lattice systems and a detailed analysis of the physical and mechanical properties of Chusquea bamboo. Using parametric modeling tools such as Rhinoceros and Grasshopper, iterative prototypes were created to explore various geometric configurations. Additionally, advanced manufacturing techniques, including 3D printing and the fabrication of metallic joints—both in welded steel rods and metal plates—were incorporated, optimizing strength and ensuring efficient modularity in the assembly. These joints were designed to facilitate quick and precise assembly, maximizing the structure's stability without compromising its lightness and adaptability.

The results highlight the feasibility and efficiency of the proposed system, combining geometric optimization and the use of sustainable materials such as bamboo. This approach allows for greater versatility in architectural design, offering lightweight and durable solutions that meet the demands of emerging urbanism. The implementation of standardized joints, with elements in both rod and metal

plate, enhances stability and durability, minimizes environmental impact, and ensures a swift and effective assembly in temporary public spaces.

Keywords: Itinerant structures, Spatial lattice system, Intermittent structures, Three-dimensional reinforcement, Unconventional structures

Introducción

Los reticulados espaciales se componen de barras y nodos, formando un conjunto para darle mayor rigidez y resistencia a una estructura conforme a su composición, la cual actúa en tres dimensiones. El sistema estudiado en este trabajo se materializa de acuerdo a una geometría derivada de tetraedros que lo hace liviano, resistente y estable, los principales esfuerzos que transmite son los de compresión y tracción, aplacando a la flexión de las barras. Esta red estructural hace que sea de un menor costo ya que se aprovechan todas sus cualidades, como la reducción de sus secciones dado que las fibras se sitúan en una capacidad máxima de uso, aprovechando las propiedades para aplicar la bioconstrucción con el uso de Bambú y desarrollando una solución técnica para las uniones articuladas.

Es claro que este tipo de sistema ha funcionado bien para luces de grandes dimensiones, pero enfocándonos en sus características principales se obtiene que se puede aplicar en otro tipo de estructuras no convencionales a una menor magnitud. El enfoque sustancial de la investigación es desarrollar una simetría en forma de arco con el sistema de reticulados espaciales a estructuras itinerantes, lo que hace que perdure en un determinado tiempo y asimismo su funcionalidad se adaptaría a proyectos de menor grado, desarrollando una solución auto armable para ferias itinerantes en la concepción de urbanismo emergente en la permeabilidad del espacio público.

Hipótesis

La implementación de un prototipo geométrico basado en la figura del tetraedro, utilizando reticulados espaciales contruidos con bambú Chusquea Carrizo, permitirá el desarrollo de estructuras temporales ligeras, resistentes y fácilmente desmontables, adecuadas para su uso en ferias itinerantes en espacios públicos. Se espera que estas estructuras no solo mejoren la eficiencia en el montaje y desmontaje, sino que también ofrezcan una solución sostenible y económica para la creación de espacios culturales temporales.

A través del uso de un diseño modular basado en reticulados espaciales, se puede optimizar la construcción de estructuras temporales mediante la estandarización de uniones y componentes. Al aplicar un enfoque de diseño paramétrico, se facilitará la fabricación y ensamblaje de las piezas, lo que permitirá una rápida adaptabilidad y personalización según las necesidades del espacio y del evento. Esta metodología no solo mejorará la eficiencia estructural, sino que también reducirá los costos y el tiempo de montaje en un 30% en comparación con métodos tradicionales.

La implementación de estructuras temporales de reticulado espacial en bambú en espacios públicos no solo proporcionará soluciones prácticas y estéticas para eventos culturales, sino que también promoverá el uso de materiales sostenibles y fomentará la conciencia ambiental en las comunidades. Se espera que estas estructuras contribuyan a la revitalización de espacios públicos, promoviendo la interacción social y cultural, y generando un sentido de pertenencia y apreciación por el patrimonio natural.

La relevancia de esta investigación radica en su capacidad para innovar en el campo de la arquitectura efímera mediante el uso de bambú Chusquea Carrizo, un recurso natural abundante en muchas regiones de América Latina. Al desarrollar un sistema estructural que sea a la vez ligero, resistente y fácil de ensamblar, se pretende no solo satisfacer las necesidades funcionales de las

ferias itinerantes, sino también reducir el impacto ambiental de la construcción temporal. Estudios previos han demostrado que el uso de bambú puede reducir las emisiones de carbono en hasta un 50% en comparación con materiales convencionales.

Este proyecto también contribuirá al cuerpo de conocimiento existente sobre la aplicabilidad de los reticulados espaciales en contextos no convencionales, proporcionando un modelo para futuras investigaciones y aplicaciones en arquitectura sostenible y diseño de eventos. Al combinar principios de eficiencia estructural con materiales ecológicos, esta investigación propone una solución innovadora y pragmática para los desafíos contemporáneos de la construcción temporal y la sostenibilidad ambiental.

Planteamiento del problema

En la actualidad, las estructuras de reticulados espaciales son ampliamente utilizadas para cubrir grandes luces, principalmente en infraestructuras de gran escala como estadios y auditorios, debido a su capacidad para distribuir cargas de manera eficiente y reducir la necesidad de soportes intermedios (Escrig & Valcárcel, 1994). Sin embargo, su aplicación en estructuras de menor escala, especialmente en contextos de uso temporal y cultural como ferias itinerantes y eventos al aire libre, sigue siendo limitada. Esto se debe a la percepción de que estas estructuras requieren un diseño y fabricación complejos, lo cual no es necesariamente adaptable para aplicaciones de menor envergadura (Chilton, 2000)

El uso de sistemas de reticulados espaciales en estructuras pequeñas podría revolucionar la manera en que diseñamos y construimos espacios temporales, proporcionando soluciones que sean no solo estéticas, sino también altamente funcionales y sostenibles. El bambú *Chusquea Carrizo*, reconocido por su alta resistencia a la tracción y flexión, combinado con una geometría de reticulados espaciales basada en el tetraedro, presenta una oportunidad única para crear estructuras que sean ligeras, resistentes y fáciles de montar (Janssen, 2000). Estas características son particularmente relevantes para su uso en contextos de ferias itinerantes, donde la movilidad y la rapidez de instalación son cruciales.

Además, la implementación de uniones estandarizadas y paramétricas para elementos de bambú puede simplificar significativamente el proceso de montaje y desmontaje, reduciendo los costos y el tiempo de instalación, y permitiendo la reutilización de los componentes estructurales en diferentes configuraciones y localizaciones (Aguinaldo, 2015). Este enfoque modular no solo maximiza la eficiencia estructural, sino que también contribuye a la sostenibilidad ambiental, al utilizar un material renovable y reducir el desperdicio.

Esta investigación pretende llenar un vacío significativo en el conocimiento sobre la aplicabilidad de las estructuras de reticulados espaciales en entornos de pequeña escala y su potencial para ser

utilizados en aplicaciones temporales y móviles. Al explorar la integración de la geometría del tetraedro con un material tradicional como el bambú, este estudio puede proporcionar nuevas perspectivas sobre cómo los principios de la geometría estructural pueden ser adaptados para satisfacer las necesidades modernas de construcción temporal y adaptable (Harries, 2012)

Además, este proyecto busca desarrollar un prototipo geométrico que pueda servir como un modelo para futuras investigaciones y aplicaciones en arquitectura sostenible y diseño de eventos. La combinación de principios estructurales avanzados con materiales ecológicos puede establecer un precedente para nuevas prácticas constructivas que no solo sean eficientes, sino también respetuosas con el medio ambiente y socialmente responsables.

La implementación de este tipo de estructuras en ferias itinerantes no solo tiene el potencial de mejorar la estética y funcionalidad de los eventos culturales, sino que también puede fomentar un mayor uso de materiales sostenibles y técnicas de construcción innovadoras. Al facilitar la creación de espacios adaptativos y accesibles, este enfoque podría democratizar el acceso a la arquitectura de calidad, permitiendo a las comunidades locales utilizar estas estructuras para una variedad de eventos y funciones temporales.

Esto nos llevará a resolver las siguientes preguntas; **¿Cómo se puede resolver una estructura itinerante de baja escala empleando un sistema modular de reticulados espaciales basado en la geometría del tetraedro empleando bambú Andino?**

Justificación

El diseño y desarrollo de un prototipo geométrico en reticulados espaciales utilizando bambú Chusquea Carrizo para ferias itinerantes en espacios públicos responde a la necesidad de estructuras temporales que sean ligeras, resistentes, y fáciles de montar y desmontar. Actualmente, la mayoría de las estructuras temporales emplean materiales convencionales como el acero o el aluminio, que, aunque efectivos, presentan limitaciones en términos de sostenibilidad y costo. La utilización del bambú, un material renovable con una alta relación resistencia-peso, puede reducir significativamente el impacto ambiental y los costos de producción de estas estructuras (Janssen, 2000). Estudios han demostrado que el uso de bambú puede disminuir las emisiones de carbono en hasta un 50% comparado con materiales convencionales (Janssen, 2000), lo que subraya su potencial en la arquitectura sostenible.

Desde el punto de vista metodológico, este estudio busca innovar en la aplicación de principios geométricos avanzados y en la utilización de materiales sostenibles. Al basar el diseño en la geometría del tetraedro, se permite la creación de estructuras reticuladas que optimizan la distribución de cargas y minimizan el material necesario sin comprometer la integridad estructural (Escrig & Valcárcel, 1994). Este enfoque no solo aprovecha las propiedades intrínsecas del bambú, sino que también introduce un sistema modular que facilita el montaje y desmontaje rápido, lo que es esencial para estructuras que necesitan ser transportadas y reutilizadas en diferentes ubicaciones (Harries, 2012). Además, la creación de uniones estandarizadas y paramétricas para el bambú Chusquea Carrizo permite un ensamblaje eficiente y adaptable, mejorando la capacidad de respuesta ante las diferentes necesidades espaciales y funcionales de los eventos temporales (Aguinaldo, 2015).

La implementación de estructuras temporales eficientes y sostenibles en espacios públicos tiene un impacto directo en la calidad de vida de las comunidades. Estas estructuras pueden ser utilizadas para eventos culturales, educativos y recreativos, fomentando la interacción social y el acceso a la cultura en espacios públicos. Además, al emplear materiales locales y sostenibles como el bambú Chusquea Carrizo, se promueve el uso de recursos naturales renovables y se apoya a las economías locales, especialmente en regiones donde el bambú es abundante (Chilton, 2000). Esto no solo contribuye a la sostenibilidad ambiental, sino que también refuerza la identidad cultural y el sentido de pertenencia de las comunidades.

Este estudio se suma a la creciente evidencia de que los materiales sostenibles pueden ser utilizados en aplicaciones estructurales complejas y no convencionales, ofreciendo soluciones prácticas y adaptables para las necesidades contemporáneas de la construcción temporal. Al desarrollar un prototipo geométrico en reticulados espaciales con bambú, se espera aportar un modelo viable para futuras investigaciones y aplicaciones en la arquitectura efímera y sostenible. Este proyecto no solo aborda los desafíos prácticos y metodológicos de la construcción temporal, sino que también ofrece una visión para una arquitectura más responsable y alineada con los principios de sostenibilidad y eficiencia.

Objetivos**Objetivo General**

Desarrollar un prototipo de estructuras en el sistema reticulado espacial en bambú Chusquea Carrizo con uniones estandarizadas, aplicado a un pabellón itinerante para ferias universitarias.

Objetivos Específicos

Establecer el comportamiento estructural y las formas de agrupación de los elementos de un sistema reticulado espacial derivado de la geometría del tetraedro, para su aplicación en una estructura itinerante en Bambú chusquea.

Diseñar los elementos del sistema reticulado espacial enfocado a la solución de uniones articuladas y rígidas para barras fabricadas en Bambú Chusquea, para lograr la fabricación estandarizada en un sistema modular.

Determinar el proceso de fabricación y de armado en la construcción modular de un prototipo aplicado a un pabellón de ferias universitarias itinerantes, por medio de la generación de un manual técnico de montaje.

1 Marco de la investigación

Desde hace mucho tiempo se han venido generando nuevos diseños estructurales y geométricos en cuanto al sistema de reticulados espaciales, abarcando grandemente en avances tecnológicos y matemáticos para la conformación de estas estructuras, implicando al tiempo los recursos de sus materiales y aplicándolos en estos, por ello es importante saber de dónde proceden y cuáles son los referentes implementados durante todo este tiempo, los cuales formulan sus características mecánicas y físicas para la elaboración y transformación de nuevos prototipos.

1.1 Antecedentes

El desarrollo de estructuras basadas en reticulados espaciales ha evolucionado considerablemente desde su concepción inicial, adaptándose a diferentes necesidades arquitectónicas y contextos. Este estudio se centra en la aplicación de estos sistemas en el diseño de prototipos geométricos utilizando bambú Chusquea Carrizo para ferias itinerantes en espacios públicos, un enfoque que no solo busca aprovechar las ventajas estructurales y estéticas de los reticulados espaciales, sino también promover el uso de materiales sostenibles y técnicas de construcción innovadoras.

1.1.1 Evolución Histórica de los Sistemas Reticulados

Como principal fuente tenemos a Palladio (1570), quien creó el primer reticulado triangular para aplicarlo a un puente. En la edad medieval se implementaban las cerchas planas en madera para cubiertas en las iglesias y en el siglo XIX, se desarrolla y se hace más notable este tipo de sistema reticular.

Abarcando nuevamente el tipo de diseño de cerchas, se comienza a usar en otros tipos de construcciones; como en los depósitos, salones de exposiciones, cubierta en estaciones del ferrocarril como primera exploración a grandes espacios, son cambiados por las cerchas de madera, siendo las cerchas de hierro un gran sustituto por sus características (liviano y su forma de fabricación serial).

Se configura una estructura con hierro forjado y cristal, como reticulado metálico en un sistema autónomo. El cuál es el Palacio de Cristal o más conocido como Crytal Palace creado por John Paxton en 1851

Se da la primera cúpula reticulada, en Berlín. (1863), por J.W. Schwedler, propone una cúpula de 40m de distancia de una sola malla plana, aquí empiezan aparecer los primeros reticulados con forma circular.

También debemos destacar a Henry Bessemer fundador del acero quien dio inicio a la fabricación de una producción masiva dándolo a un precio asequible esto data en la Edad moderna (1856), como lo mencionan Ching et al. (2014).

William Barlow (1868) plantea una estructura de arco triangulado para la estación de Saint Pancras, Londres, reino unido. Gracias a la incorporación de nuevos materiales como el hierro se fueron formando estos prototipos en puentes y estructuras de edificaciones, como las cubiertas, y con la aleación del hierro y el carbono se produjo el acero, un material mucho más versátil y resistente, mejorando sus capacidades mecánicas, de esta manera comienza a tener auge en las nuevas implementaciones constructivas.

Aparece otro autor en 1881 Charles Stroebeel quien estandarizó los perfiles de acero forjado y las conexiones roblonas. En 1889 se realiza una exposición donde se muestra un reticulado de dos aguas con una gran magnitud de luz (114 metros). Galería de machines. En ese mismo año se desarrolló por Gustave Eiffel, la emblemática Torre Eiffel, París, Francia. Se realizó en base a estructuras intermitentes.

Unos años más adelante aparece el Puente Ferroviario Forth, (1890) con una gran propuesta utilizando estructuras reticuladas, el cual contiene tres tramos centrales.

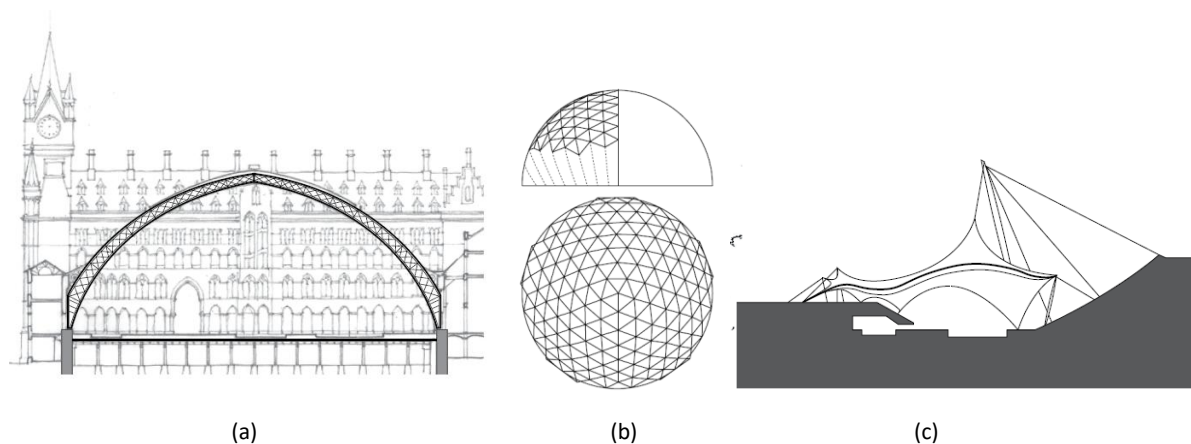
En 1903, Alexander Graham Bell, experimento con estructuras tridimensionales, enfocado en la parte geométrica de los tetraedros y octaedros, que dieron lugar a las mallas espaciales de Richard Buckminster Fuller, Max Mengerhausen y Konrad Wachmann. Este primer personaje estudio la

forma geométrica de la esfera y las aleaciones livianas, donde encuentra “que los sistemas triangulados simétricos suministran el flujo más económico de energía” (Perles, 2009, p.225). La resistencia que da se debe al entramado y el número de triángulos que lo conforman, de esta manera se llega a la estructura geodésica que gracias a su distribución no sufre deflexiones y posee una gran resistencia y rigidez, además de ser liviana. Kaiser Aluminium adoptó esta patente para crear una cubierta en forma de cúpula geodésica en aluminio, para una sala de conciertos en Honolulu, Estados Unidos.

Walter Bauerfeld incorpora la cúpula geodésica en la época contemporánea, en el planetario de Jena, Alemania (1922).

Fuller comenzó a construir cúpulas con plásticos reforzados y con fibra de vidrio de una dimensión de 16.5m, para la fuerza aérea americana, después de 1955. Se hace una comparación del peso de la cúpula propuesta por Fuller en la Union Tank Car Co, la cual mide 116m de diámetro con una altura de 38.50m, su peso es de 1.200 Toneladas, pero si miramos la cúpula construida en San Pedro que tiene como materiales la piedra, podemos ver que su diámetro es mucho menor (39.30m) pero su peso es aún mayor que la cúpula geodésica de Fuller (10.000 toneladas), contexto histórico que nos da a conocer Perles (2009).

Imagen 1 Manual de estructuras Francis D. K. Ching



(a) William Barlow, estación de St. Pancras, Londres, Reino Unido; (b) Walter Bauerfeld, planetario, Jena, Alemania; (c) Frei Otto, piscina olímpica, Múnich, Alemania

Hasta entonces las estructuras de reticulados espaciales comenzaron a reconocerse y emplearse en sistemas constructivos de mayor escala con ayuda de programas de cálculos para aplicar a estructuras hiperestáticas. Este desarrollo histórico nos da a entender un avance del sistema de reticulados desde su aparición hasta en estos últimos tiempos, mostrando una progresión geométrica en cuanto a sus cuerpos y abarcando un sobre todo un empleo en estructuras amplias.

1.1.2 Aplicaciones Contemporáneas de los Reticulados Espaciales

En las últimas décadas, los sistemas reticulados espaciales han encontrado aplicaciones en una variedad de contextos arquitectónicos y de ingeniería, desde estadios y aeropuertos hasta pabellones y estructuras temporales. La versatilidad de estos sistemas, combinada con su capacidad para soportar grandes cargas con un mínimo de material, los hace ideales para aplicaciones en las que se requiere una rápida instalación y desmontaje.

La arquitectura efímera ha emergido como un campo de gran interés, particularmente en el diseño de estructuras para eventos temporales, exposiciones y ferias. Un estudio reciente de Aguinaldo y Escamilla (2015) exploró la eficiencia estructural y económica de las uniones en bambú guadua para construcción modular, demostrando que el uso de materiales locales y sostenibles puede reducir significativamente los costos de construcción y el impacto ambiental. Estos hallazgos son relevantes para el diseño de estructuras en bambú Chusquea Carrizo, un material que comparte muchas de las propiedades deseables de la guadua, como su alta resistencia a la tracción y flexión (Janssen, 2000).

El bambú ha ganado reconocimiento como un material de construcción sostenible debido a su rápido crecimiento, alta resistencia y capacidad de regeneración. En regiones de América Latina y Asia, el bambú se ha utilizado durante siglos en la construcción de viviendas y estructuras simples, pero su potencial en aplicaciones arquitectónicas más complejas está siendo explorado actualmente. Harries et

al. (2012) subrayan la necesidad de estandarización en el uso del bambú como material de construcción estructural, destacando su potencial para aplicaciones modernas y su impacto positivo en la sostenibilidad ambiental.

La adopción de geometrías avanzadas basadas en principios como el tetraedro no solo optimiza la eficiencia estructural, sino que también minimiza el uso de materiales y reduce el peso total de la estructura. La investigación de Escrig y Valcárcel (1994) en estructuras desplegables de barras ha demostrado que las configuraciones geométricas derivadas del tetraedro pueden proporcionar una alta rigidez y estabilidad, características esenciales para estructuras temporales que deben soportar diversas cargas y condiciones climáticas.

1.2 Exploración de las geometrías mínimas.

Las geometrías mínimas, también conocidas como superficies mínimas, se refieren a configuraciones geométricas que minimizan el área de una superficie sujeta a ciertas condiciones de borde. En el contexto de los reticulados espaciales, estas geometrías son fundamentales para maximizar la eficiencia estructural y minimizar el uso de materiales, lo cual es crucial en el diseño de estructuras temporales y sostenibles. La exploración de geometrías mínimas permite la creación de estructuras que no solo son ligeras y estéticamente atractivas, sino también altamente eficientes en términos de resistencia y estabilidad.

Se experimenta con ensayos como son el juego de películas de jabón para visualizar la estructura interna de las geometrías, apareciendo varios tipos de configuraciones capaces de ser estudiadas como amplio contexto estructural, donde llega a un módulo y se repite periódicamente (intermitente), demostrando la tensión superficial que tiene la geometría es el camino más rápido de unir cada superficie del sólido, determinando que por cada curva cerrada se puede encontrar superficies de área mínima.

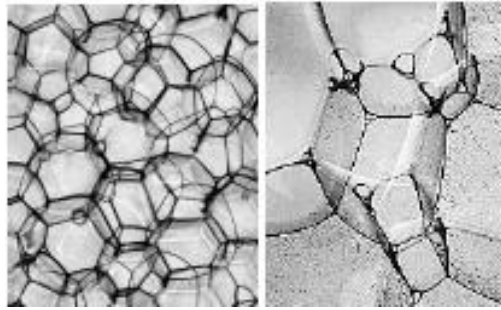
1.2.1 Teorías geométricas

La exploración de las geometrías mínimas en reticulados espaciales involucra tanto un enfoque teórico como práctico. Desde el punto de vista teórico, es fundamental comprender las propiedades matemáticas de las superficies mínimas y cómo pueden aplicarse a la arquitectura. Esto incluye el estudio de superficies como la helicoides, la catenoide y el paraboloide hiperbólico, todas las cuales son ejemplos de superficies mínimas que pueden ser utilizadas en el diseño de reticulados espaciales (Thompson, 1999).

Desde una perspectiva práctica, la implementación de geometrías mínimas en reticulados espaciales requiere la utilización de tecnologías avanzadas de diseño asistido por computadora (CAD) y modelado paramétrico. Estas herramientas permiten a los arquitectos y diseñadores explorar una amplia gama de configuraciones geométricas y evaluar su rendimiento estructural antes de la construcción (Kolarevic, 2003). La capacidad de modelar y simular diferentes configuraciones geométricas en un entorno virtual permite optimizar el diseño para cumplir con requisitos específicos de carga, peso y estética.

Rigiéndose la teoría mediante leyes científicas, como son las de Plateau que expresa que tres superficies de jabón se intersectan a lo largo de una línea y estas son creadas por tres intersecciones de superficies, la regla de Schwartz dice que las superficies generan una arista como principio de camino rápido orientada en la ruta de interconexión de varios puntos en una sola red. (Suárez & Pacheco, 2014)

Imagen 2 Detalle de caminos rápido en películas de jabón



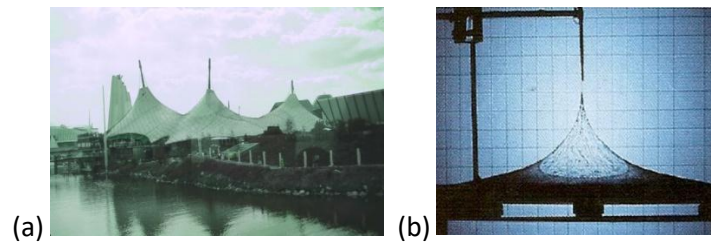
recorridos mininos para unir vértices de un polígono

En la experimentación de Plateau dice que los segmentos se unen por películas por ángulos de 120 grados cuando las láminas se cortan al largo de una línea, se pueden también ver cuatro lamina que se cortan en un punto y generan entre ellas 109 grados.

Componiendo un tipo de propiedades físicas donde hay energía potencial, se ejerce un trabajo de tensión de superficies, que muestra existencias de fuerza de presión que tienden a una curvatura natural siendo esta la recolección de estudios geométricos de la estructura para la posterior aplicación en el campo del diseño.

La principal aplicación de la aplicación de las teorías matemática para llevarlas a las estructuras no convencionales, son las edificaciones de Frei Otto que busca como principal factor en su composición la solución de cubrir grandes superficies a partir de estructura ligeras, especializándose en el estudio de la naturaleza con sus principales hipótesis que se da a la solución de la exploración máxima de las propiedades y comportamientos de los materiales como recurso de transición de cargas a elementos a trabajo de compresión y tracción.

Imagen 3 Pabellón de Alemania en Montreal



(a) Fotografía de pabellón (b) Experimento de película de jabón por medio de hilos

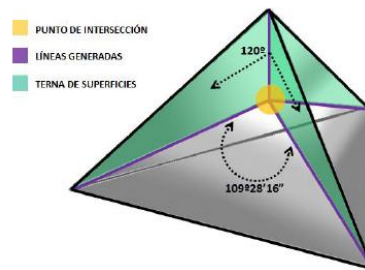
En la ilustración se ve el trabajo de la solución que realiza Otto con las superficies de área mínima, generando una gran cubierta que cuenta con un poste que lleva todo el sistema estructural que genera tensión en las envolventes textiles, que la estructura es generada por los diferentes modelos basados en las películas de jabón que se componen por la proyección de películas en hilos cerrados.

1.2.2 Geometría del tetraedro con SAM

Las agrupaciones de SAM, las cuales están formadas por superficies, aristas y puntos en común. Las superficies pueden asumir diversas formas y las aristas se intersectan siempre formando un ángulo de 120 grados. Los puntos de encuentro forman un ángulo de $109^{\circ}, 28' y 16''$.

El grado de complejidad de una SAM varía según el número y la disposición de sus elementos, clasificando en tres niveles distintos dependiendo si contiene uno, dos o tres componentes. En el primer grado no existen desacuerdos ni concordancias, en cambio, en el segundo nivel hay diferencias, pero no puntos de encuentro y finalmente, en el tercer nivel se presentan tanto intersecciones entre elementos como lugares donde coinciden.

Imagen 4 SAM en la geometría de tetraedro



La regla 2 de Schwarz se utiliza en un sistema de láminas de jabón para reducir al máximo el área total del sistema, Cada vez que tres superficies lisas se encuentran en este sistema, forman una arista en el punto de intersección común, Cada arista es una línea lisa, y cuando dos láminas se cruzan forman un ángulo de 120° , En este punto, solo se pueden encontrar cuatro aristas que estén formadas por la intersección de tres superficies. En ese punto, el ángulo que se forma entre cada par de aristas coincidentes es de $109^\circ 28' 16''$.

- Encuentro de superficies: Se pueden formar reuniones de hasta tres superficies conectadas a lo largo de uno de sus extremos en una misma aristas
- Ángulos entre superficies: Entre dos de las tres superficies que coinciden en un borde, el ángulo formado es de 120° .
- Encuentro de aristas: El sistema de películas que se unen produce aristas que convergen en un máximo de cuatro, en un punto de encuentro.
- Ángulos entre aristas: En un punto de encuentro, los pares de aristas concurrentes forman ángulos que miden 109 grados con 28 minutos y 16 segundos.

1.3 Aplicación de Geometrías Mínimas en Reticulados Espaciales

Los reticulados son armaduras tridimensionales desarrolladas por componentes metálicos en su principal realización, pero con un gran campo en fibras naturales, se componen de figuras como son los tetraedros, octaedros, pirámides, etc. Llegando a un trabajo del elemento de esfuerzos internos en

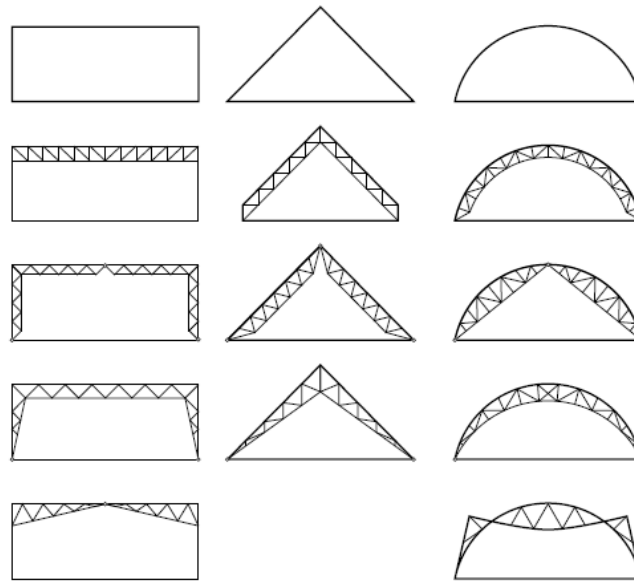
aplicación de cargas con mucho desarrollo de flexión, que determina la concentración de uniones produciendo una hiper-esteticidad, cumpliendo requisitos de rigidez, estabilidad y resistencia por la geometría, y notoriamente por las condiciones en las que se hallan las uniones. Aprovechando el área mínima que genera las articulaciones siendo poca la cantidad de material que descansa sobre la superficie en cualquier forma esto llegando a ejecutarse por la tecnología de teorías básicas de los sólidos platónicos.

Las estructuras con triangulación son capaces de soportar grandes cargas sin deformarse, los triángulos son polígonos de tres lados que se unen por tres puntos llamados vértices, generando una sección de base con un punto de equilibrio en eje de rotación. Estableciendo en la rotación de su módulo un arco trapecial en los cuales concreta puntos de peso de fuerza de atracción, esta distribución se realiza de manera sistemática siendo la misma en cada punto. Esto a su vez crea momentos de torsión que son producidos por cambios rotacionales que al sumar sus fuerzas esa totalidad tiende a validar cero. Los arcos semicirculares se componen por estribos que son los encargados de desviar el peso, ya que su principal esfuerzo es la compresión que empuja hacia afuera por el largo de la estructura, siendo la tensión efecto de la curvatura, no llegando a necesitar soportes adicionales.

En la representación de los métodos espaciales son redes en el espacio, que generan un principio de triangulación con la sistematización de barras conectada por nodos dependiendo de su aplicación donde se denomina armaduras tridimensionales o mallas espaciales. Estas estructuras son eficientes para la transmisión de cargas ya que son elemento que actúan en conjunto pueden resistir acciones de carga concentradas llegando a la determinación estática por la ley de Foppi que habla de la estabilidad de armaduras espaciales, llegando a determinar que los sólidos platónicos son estables si su composición de elementos de barras con nodos se determina por la triangulación de los elementos y el caso de que cubos se tienen que formar la estabilidad si se triangulan las caras. (flores, 1998)

Las barras son los conectores de transporte de la carga, teniendo rigidez que define la estabilidad geométrica haciéndola capaz de soportar su propio peso, empezando y terminando todas las barras con una conexión.

Imagen 5 Gran variedad de perfiles



Para el posterior desarrollo, se tiene que tener en cuenta la consideración del lugar donde se construya y generar unas condiciones básicas, el viento tiene que ser suave, el terreno contendrá un nivel uniforme y estable proveyendo puntos básicos en los cuales se fortalecerá para el correcto desarrollo de la retículas, dando fundamentos de construcción que evalúan la propiedad de la estructura como la estética armónica, con ayuda de la firmeza asegurando los apoyos dando estabilidad y funcionalidad al cumplir su objetivo planeado.

Según la ocupación de los reticulados tienen que cumplir especificaciones con las barras y nodos articulados, que parten de la modulación que hace referencia al establecimiento de una reducción de números de elementos que genera el conjunto por acumulación, la rigidez es la estabilidad geométrica que conforma la geometría esta hace que la estructura sea capaz de resistir su propia peso, las cargas

aplicadas y la forma precisada formal mediante la constancia de las dimensiones que se pueden variar en los desmontables de los módulos. (Pillares, 1986)

El fundamento de diseño tridimensional es un lenguaje visible siendo un pensamiento sistemático del espacio. Los elementos conceptuales no son visibles a la determinación principal, como se puede ver la agrupación de líneas que forma el tetraedro, los elementos visuales son esas configuraciones de líneas que forma un triángulo bidimensional que al ármalo forma la una pirámide con base triangular, desarrollado por los cuatro triángulos principales del elemento visible, los elementos de relaciones determina la dirección de cómo la geometría se comporta con otros tetraedro cercano y la relación de espacio del tetraedro de la configuración del reticulado y como último elemento son las prácticas de llegar al alcance de la geometría con base de la representación derivada de la naturaleza. (Wong, 1991)

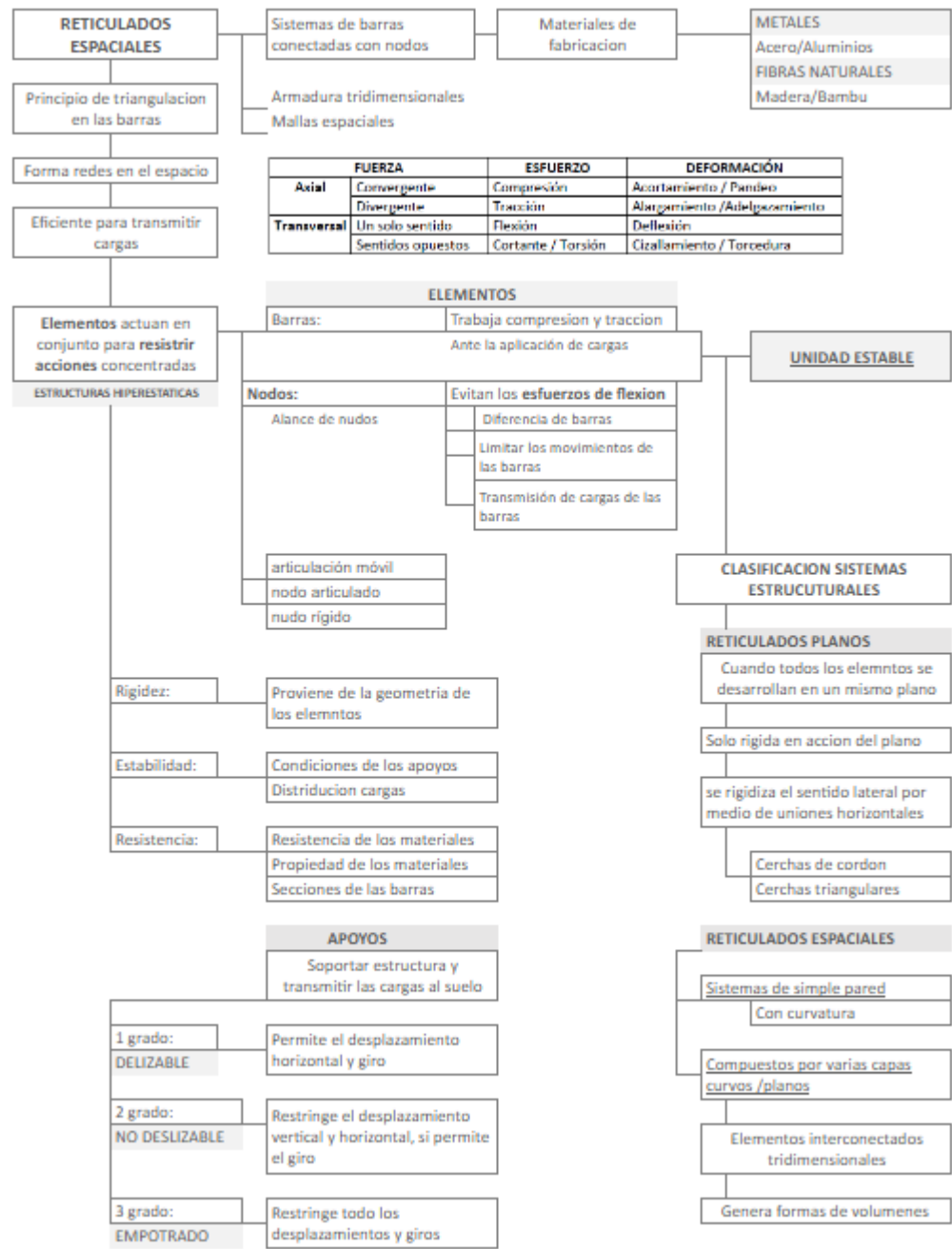
1.3.1 Clasificación de sistemas reticulares

Los sistemas reticulares pueden clasificarse según su configuración geométrica, material utilizado y método de ensamblaje. Los tipos más comunes incluyen reticulados planos, reticulados curvos y cúpulas geodésicas. Cada tipo de reticulado ofrece ventajas específicas en términos de resistencia, estabilidad y estética, lo que permite su uso en una amplia gama de aplicaciones arquitectónicas (Escrig & Valcárcel, 1994).

Los sistemas estructurales que utilizan barras conectadas con nodos se conocen como reticulados espaciales. Se pueden fabricar estos sistemas utilizando materiales metálicos o fibras naturales como la madera y el bambú, basándose en la triangulación de las barras para formar redes espaciales con figuras geométricas. Los elementos tienen la capacidad de funcionar tanto bajo compresión como tracción, y las conexiones articuladas disminuyen los esfuerzos debido a la flexión. Aunque los sistemas de reticulados espaciales son eficientes para la transmisión de fuerzas y resisten

cargas concentradas, tienen un nivel elevado de hiperestaticidad que demanda el uso de programas informáticos para su cálculo estructural.

Imagen 6 Clasificación de los sistemas reticulados espaciales.



Fuente propia

1.3.2 Comportamientos estructurales

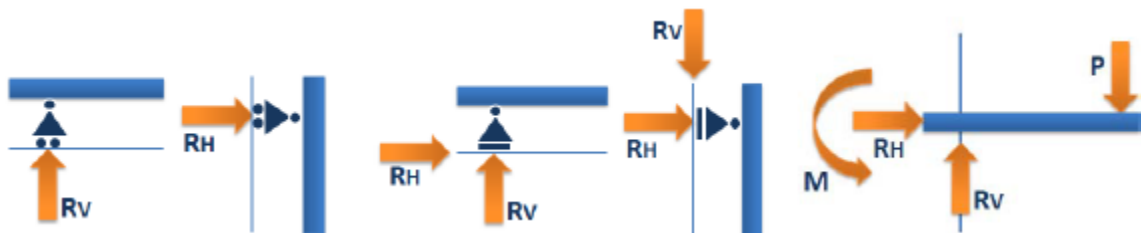
El comportamiento estructural de los reticulados espaciales depende de la geometría utilizada y del material con el que se construyen. En general, las geometrías mínimas permiten una distribución uniforme de las cargas a lo largo de la estructura, reduciendo los puntos de tensión y aumentando la estabilidad. El uso de bambú Chusquea Carrizo, con su alta resistencia a la tracción y flexión, proporciona una solución efectiva para crear estructuras ligeras y resistentes, ideales para aplicaciones temporales y móviles (Janssen, 2000).

El análisis estructural. Para verificar el correcto funcionamiento y construcción de una estructura en un sistema de reticulados espaciales, es crucial tener conocimiento acerca de las secciones requeridas para las barras, el trabajo estructural que deben realizar estas y los desplazamientos que experimentará la estructura. Antiguamente, se empleaban distintos métodos manuales para resolver las incógnitas estructurales en cerchas planas isostáticas como el método de Ritter, Cremona y los nudos. No obstante, la eficacia de estos métodos disminuye considerablemente en reticulados espaciales debido a su hiperestaticidad. En la actualidad, para analizar el comportamiento estructural se considera que los programas informáticos basados en el método de los elementos finitos son las herramientas más adecuadas. En el método de los elementos finitos, se considera la estructura como una colección de piezas pequeñas unidas en nudos limitados, y las cantidades desconocidas a resolver son los desplazamientos de dichos nudos con el fin de determinar la deformación que sufre la estructura. Al final, se obtienen aproximadamente las soluciones para cada elemento con una cantidad limitada de parámetros.

Tipos de apoyos: Los diferentes tipos de apoyos empleados en estructuras. Los apoyos cumplen la función de sostener la estructura y transferir las cargas hacia el suelo. Se clasifican en tres tipos: Existen diferentes tipos de apoyos en estructuras: el apoyo de primer grado, que permite movimientos

horizontales y giros pero restringe los desplazamientos verticales; el apoyo de segundo grado, que permite giros pero restringe tanto los desplazamientos horizontales como verticales; y finalmente, tenemos el apoyo de La imagen muestra las tres categorías de apoyos, señalando que el apoyo de primer nivel provoca una reacción, mientras que el de segundo grado produce dos respuestas y el de tercer grado ocasiona tres reacciones.

Imagen 7 Tipología de apoyos



Sistemas de fuerzas: Las cargas presentes en las estructuras son la causa de las fuerzas, que se representan mediante vectores con magnitud y dirección. Las fuerzas se aplican en puntos específicos conocidos como puntos de aplicación, y provocan reacciones en los soportes de la estructura. Estas cargas también generan fuerzas internas de resistencia que provocan la deformación y los esfuerzos en la estructura.

1.4 Fundamento de aplicación de los sistemas reticulados.

Por consiguiente, se define como un sistema de equilibrio, por lo que sus fuerzas siempre están inclinadas y muy ligadas a la resistencia de material del que se conforman. Entre sus características están los elementos que componen la retícula, que principalmente sirve para el desarrollo de ella, la conexión básica son los nudos y amarres que instan de fuentes primordiales para la estabilidad, estos pueden ser fijos o modulares, dado que en los nudos integran físicamente la conexión de la resistencia y disipación.

La presencia de esfuerzos esta caracterizados por la distribución parcial de barras que generan esfuerzos de tracción, esto a su vez es procesado por la compresión de los nodos llegando a un

comportamiento flexible y sismo resistente. El área mínima se determina en la cantidad de material que descansa sobre la superficie en diversas formas, esto llegando a ejecutarse por la tecnología de teorías básicas de cálculo infinitesimal ya que desarrolla un contexto más científico hacia la geometría.

Ya resuelto el área y las especificaciones estructurales, se plantea la configuración de un elemento liviano con un mínimo de material en donde se encuentra un alto campo de cubiertas textiles, debido a su gran aplicación de ensayos de películas de jabón que se unen por hilos con puntos de apoyos específicos configurándose como la base del diseño.

Las cualidades y caracteres de los reticulados se proceden de varios grupos, los cuales son:

1. Estandarización productiva: en cuanto a la fabricación de los componentes modulares (nodos y barras), se genera un pre dimensionamiento y coordinación de estas, para que en el proceso de fabricación sea de manera sistemática disminuyendo costos en la producción y ensamblaje.

2. Economía: Existe un favorecimiento en cuanto al proceso de cimentación ya que, al calcular y distribuir las fuerzas aplicadas en elementos estructurales, el peso disminuye gradualmente y así se emplea una menor cantidad de piezas.

3. Seguridad estructural: partiendo de cargas concentradas, estas no van a producir un colapso ni alteración alta en los componentes que transmiten las fuerzas internas, equilibrando mediante la distribución variante de las fuerzas. Además, el material a emplear contiene un alto nivel de estabilidad en el fuego.

4. Desarrollo sismo resistente: al ser una estructura hiperestática origina ductilidad, que genera un buen comportamiento en peligros con la resistencia, gracias a la esbeltez de sus componentes es un elemento ligero y rígido.

5. Eficiencia estática: distribuye la energía y fuerzas en diferentes direcciones que se encuentran en el efecto-espacio, implementando un estado de esfuerzos por fuerzas axiales con el efecto reticular. Aspectos bases para un buen manejo y óptima relación de estos.

6. Parte estética e integración: aporta gran variedad de expresión y composición en el diseño arquitectónico, donde se abarca una gran resolución de esquemas estructurales. La conexión establecida reside en sus componentes y materiales a servirse.

1.4.1 Desarrollos existentes de cubiertas de reticulares

Las cubiertas reticuladas han sido utilizadas en una variedad de proyectos arquitectónicos para cubrir grandes espacios sin soportes intermedios. Ejemplos notables incluyen el Estadio Olímpico de Múnich diseñado por Frei Otto y la Cúpula del Parlamento de Alemania, que utilizan principios de reticulados espaciales para lograr una estructura ligera y eficiente (Otto, 1988). Estos ejemplos demuestran la versatilidad de los sistemas reticulados para aplicaciones en una amplia gama de contextos arquitectónicos, desde espacios públicos hasta instalaciones deportivas.

Dentro de los referentes nacionales podemos encontrar la cubierta modular itinerante, que nos induce a una ejemplificación del prototipo de estructura para el arquetipo de construcciones removibles. Los factores que emplea son; el diseño de cubierta modular efímera configurable y transportable, su aplicación está planteado para espacios de ferias itinerantes, donde se realizan talleres y actividades culturales basadas en el arte, la música, el teatro, entre otros, para ser usado como si simulara un auditorio.

Su proceso de producción es rápido y fácil gracias a sus características físicas y mecánicas, igualmente lo es en la parte de transporte, ya que tiene un peso reducido y no ocupa tanto espacio, en el momento de armado y desmonte se agiliza esta acción. Este proyecto se hizo visible por la asociación Bienal Iberoamericana de Diseño (BID), donde los profesionales y/o diseñadores muestran y exponen en encuentros culturales el desarrollo de sus diseños de itineranticas haciendo notorio el trabajo y la evolución de este con premios o menciones, como la cubierta modular de Casas buenas et al. (2013).

Imagen 8 Cubierta modula - Concurso Idearte



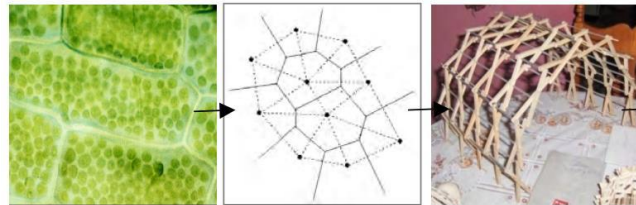
Tomado de <https://bit.ly/2MEGI7n>

Otro avance en los sistemas de estructuras flexibles que se pueden encontrar a nivel internacional es un prototipo de diseño de cubierta retráctil tensada planteado por Carlos Morales (2013) en México, donde expone una investigación sobre la geometría orgánica (natural) aplicado a la arquitectura, para la realización de un sistema plegable, flexible y adaptable en la naturaleza, de tal forma se encarga de enfatizar en las uniones y en el cómo se va a optimizar su fijación a los demás componentes. Comienza con la geometría fractal segmentada, para la creación de un cuerpo complejo y de varias figuras itinerantes de esta forma se plantea una malla reticular plegable en forma de arco, conformado por la figura X, estos se consolidan y forman triángulos. Morales (2013) toma como base las estructuras biónicas y la morfología geométrica para constituir una malla reticular plegable, del cual se desprende un arco, su manera itinerante forma espacios modulares con una fácil adaptación y montaje. También analiza el desarrollo en la elaboración de varios modelos geométricos tridimensionales conforme a la estructura biónica (natural) en forma de arcos, bóvedas, domos, cúpulas, etc.

La adecuación de modelos experimentales con métodos gráficos y digitales cumple un gran propósito para la creación de estructuras flexibles en su estandarización. Es frecuente encontrar estructuras reticuladas tridimensionales en cubiertas como principal sistema constructivo, donde se han venido generando desde 1950 por Le Ricolais quien tomó como ejemplo las estructuras de la

naturaleza como base de diseño, para una implementación artificial pero bien asemejada, en consecuencia, se refleja la geometría en tamaño micro y macro en escala.

Imagen 9 Adecuación orgánica estructura.



Tomado de <https://bit.ly/3dDz1VF>

1.4.2 Aplicaciones en la Arquitectura Urbana

Los sistemas estructurales flexibles son una innovación arquitectónica que permite crear espacios adaptables a diversas necesidades y condiciones, siendo especialmente útiles en entornos urbanos dinámicos. Estos sistemas se caracterizan por su modularidad, ligereza, sostenibilidad y eficiencia en el uso de materiales, lo que facilita su montaje, desmontaje y reconfiguración según las necesidades del espacio (Morales Guzmán, 2017).

Pabellones Temporales en Espacios Públicos: Los pabellones temporales son una aplicación destacada de los sistemas flexibles, utilizados para eventos culturales, exposiciones y actividades recreativas. Un ejemplo emblemático es el Serpentine Pavilion en Londres, que se reconstruye anualmente con nuevos diseños que exploran la flexibilidad estructural y la adaptabilidad espacial. Estos pabellones no solo proporcionan espacios funcionales, sino que también enriquecen la experiencia urbana y fomentan la interacción social (Chilton, 2000).

Infraestructuras Urbanas Adaptativas: La flexibilidad estructural es crucial en infraestructuras urbanas que deben adaptarse a cambios en la demanda y condiciones ambientales. El "Rolling Bridge" en Londres, que se pliega y despliega para permitir el paso de peatones y embarcaciones, es un ejemplo

de cómo las estructuras flexibles pueden integrarse en la infraestructura urbana para mejorar su funcionalidad y adaptabilidad (Ching et al., 2014).

Cubiertas Retráctiles en Espacios Deportivos: Las cubiertas retráctiles son esenciales en estadios y centros deportivos, permitiendo que los espacios se adapten a diferentes condiciones climáticas y eventos. El estadio Wembley en Londres, con su techo retráctil, ofrece un ambiente cómodo y versátil para espectadores y atletas, demostrando cómo la flexibilidad estructural puede mejorar la funcionalidad de los espacios deportivos (Escrig & Valcárcel, 1994).

Estructuras de Sombra en Espacios Públicos: En climas cálidos, las estructuras de sombra flexibles son fundamentales para la habitabilidad de los espacios públicos. Las velas tensadas y las estructuras desplegables permiten crear áreas sombreadas que se ajustan a la posición del sol, mejorando la comodidad de los usuarios y reduciendo la temperatura ambiente, como se observa en las plazas de Sevilla (Morales Guzmán, 2017).

1.4.3 Casos de estudio

Pabellón de España en la Expo 2010 Shanghai: Diseñado por EMBT, este pabellón utilizó bambú y acero para crear una fachada ondulante, combinando artesanía tradicional con modernidad. Su diseño flexible y sostenible proporcionó un excelente rendimiento térmico y una adaptabilidad estructural, demostrando cómo los sistemas flexibles pueden integrarse en arquitectura contemporánea (Aguinaldo & Escamilla, 2015).

Pabellón de Kengo Kuma en la Universidad de Tokio: Este pabellón temporal, hecho de bambú y materiales reciclados, puede ser ensamblado y desensamblado fácilmente, y reconfigurado según las necesidades del evento. El uso de materiales sostenibles y un diseño modular muestra cómo la arquitectura puede adaptarse a entornos urbanos cambiantes (Janssen, 2000).

1.5 Desarrollo de los nodos en Sistemas Reticulados

En la arquitectura de reticulados espaciales, los nodos son elementos cruciales que conectan las barras estructurales, permitiendo la transmisión de fuerzas y proporcionando estabilidad a la estructura. El diseño eficiente de los nodos no solo mejora la resistencia y durabilidad de la estructura, sino que también facilita su montaje y desmontaje, lo cual es fundamental en aplicaciones de estructuras temporales y modulares (Escrig & Valcárcel, 1994). Los nodos actúan como puntos de conexión que deben ser capaces de resistir diferentes tipos de cargas, incluyendo compresión, tensión y torsión, asegurando así la integridad estructural del sistema reticulado.

Los nodos, o puntos de conexión entre barras en un reticulado, son cruciales para la integridad y estabilidad de la estructura. Los sistemas patentados de nodos permiten una rápida conexión y desconexión de los componentes, lo que facilita el montaje y desmontaje de la estructura. Estos sistemas también garantizan que las fuerzas se distribuyan de manera uniforme entre las barras, lo que maximiza la resistencia y minimiza la deformación (Aguinaldo & Escamilla, 2015).

Existen varios sistemas patentados de nodos que se utilizan en la construcción de reticulados espaciales, cada uno con sus propias ventajas y limitaciones. Algunos sistemas utilizan uniones atornilladas o soldadas, mientras que otros utilizan conexiones de encaje o compresión. La elección del sistema adecuado depende de la aplicación específica y las condiciones de uso, así como de las propiedades del material utilizado en la construcción de la estructura (Janssen, 2000).

1.5.1 Evolución y Clasificación de Nodos

El diseño de nodos ha evolucionado significativamente con el tiempo, desde conexiones simples en estructuras de madera y hierro, hasta los sistemas avanzados de hoy en día que utilizan materiales compuestos y tecnologías de precisión. Los nodos pueden clasificarse según el tipo de conexión que utilizan: conexiones atornilladas, soldadas, encajadas, o mediante el uso de adhesivos. Cada tipo de

conexión presenta ventajas y desventajas en términos de facilidad de montaje, resistencia mecánica, y durabilidad (Fuller, 1975).

- **Nodos Atornillados:** Son comunes en estructuras donde se requiere montaje y desmontaje frecuente. Los nodos atornillados permiten un ensamblaje rápido y una gran flexibilidad para modificaciones futuras. Sin embargo, requieren un mantenimiento periódico para asegurar que los tornillos permanezcan apretados y no se aflojen debido a vibraciones o cambios en las cargas.
- **Nodos Soldados:** Estos nodos ofrecen una alta resistencia y durabilidad, lo que los hace ideales para estructuras permanentes. Las conexiones soldadas son rígidas y no permiten movimientos relativos entre las barras, lo que puede ser una ventaja o una desventaja dependiendo del diseño de la estructura. Son más difíciles de desmontar y requieren equipos y habilidades especializadas para su instalación.
- **Nodos Encajados o Empotrados:** Utilizan métodos de fricción o encaje para asegurar las barras en su lugar. Son comunes en estructuras temporales y modulares debido a su facilidad de montaje y desmontaje. Estos nodos pueden tener una resistencia limitada en comparación con las conexiones atornilladas o soldadas, pero son ideales para aplicaciones donde se requiere flexibilidad y velocidad de instalación (Escrig & Valcárcel, 1994).
- **Nodos con Adhesivos:** Utilizan compuestos químicos para unir las barras en los nodos. Estos sistemas pueden proporcionar una conexión fuerte y duradera, pero requieren un control preciso del proceso de unión para asegurar la calidad y la consistencia. Son menos comunes en aplicaciones estructurales de gran escala debido a las limitaciones en la resistencia de los adhesivos bajo cargas extremas.

1.5.2 Sistemas patentados de Nodos

En la actualidad, existen varios sistemas patentados de nodos que han sido desarrollados para optimizar la eficiencia y funcionalidad de los reticulados espaciales. Algunos de estos sistemas incluyen:

- **Sistema Mero:** Uno de los sistemas más reconocidos, utiliza una bola central de acero con roscas que permiten la conexión de múltiples barras mediante pernos atornillados. Este sistema es conocido por su flexibilidad y capacidad de soportar grandes cargas, siendo utilizado en aplicaciones desde estadios hasta centros de convenciones (Chilton, 2000).
- **Sistema Unistrut:** Utiliza perfiles de acero prefabricados con nodos integrados que permiten un ensamblaje rápido y flexible. Este sistema es popular en aplicaciones industriales y comerciales donde la capacidad de modificar y expandir la estructura es crucial.
- **Sistema Nodus:** Diseñado para ser utilizado con materiales compuestos y ligeros como el bambú y el aluminio, este sistema utiliza conexiones modulares que permiten un montaje rápido y adaptable. Es ideal para aplicaciones temporales y estructuras sostenibles, como pabellones de ferias y exposiciones.

1.5.3 Desarrollo de Nodos en Reticulados Espaciales con Bambú

El uso de bambú en estructuras reticuladas presenta desafíos únicos en el diseño de nodos debido a las propiedades naturales del material. El bambú es un material anisotrópico, lo que significa que sus propiedades mecánicas varían en diferentes direcciones. Esto requiere un diseño de nodo que pueda manejar estas variaciones y proporcionar una conexión fuerte y segura (Janssen, 2000).

- **Nodos de Bambú Enfundados:** Este tipo de nodo utiliza una funda o manga de material más duro alrededor de las extremidades del bambú para proporcionar una superficie de conexión más uniforme y resistente. Las fundas pueden estar hechas de metal o materiales compuestos, y ayudan a distribuir las cargas de manera más uniforme.

- **Nodos Atornillados con Refuerzos Internos:** Se insertan refuerzos internos en las extremidades de las barras de bambú para permitir la conexión atornillada sin dañar el material. Este método combina la flexibilidad de los nodos atornillados con la necesidad de reforzar las conexiones en el bambú.
- **Nodos con Adhesivos Naturales:** Utilizan adhesivos basados en resinas naturales que se adhieren bien al bambú. Estos nodos son más sostenibles y pueden proporcionar una conexión fuerte, pero requieren un control cuidadoso del proceso de curado para asegurar la calidad de la unión.

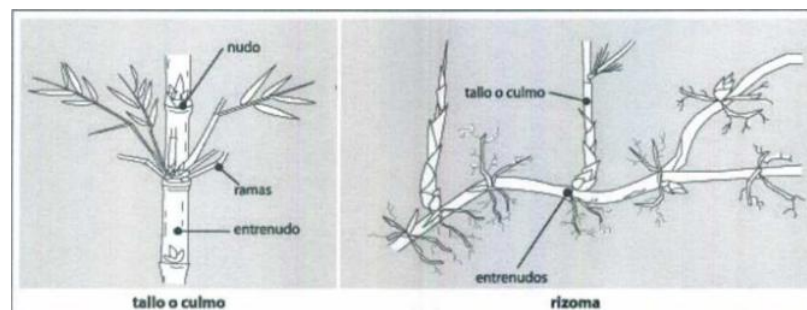
1.6 Materialidad de bambú

Las estructuras se destacan por su gran versatilidad y flexibilidad, pues permiten la creación de formas curvas y espacios amplios abiertos sin requerir soportes interiores adicionales. También, el bambú es extremadamente resistente en comparación con su peso, lo que hace posible construir estructuras ligeras, pero a la vez muy fuertes. Además, su construcción es más simple en comparación con otras soluciones estructurales debido a la posibilidad de utilizar uniones prefabricadas y menos complejas. Esto se traduce en una reducción de los requerimientos de equipos, recursos y personal especializado. Además, el bambú es un material de construcción que se renueva rápidamente y tiene bajo impacto en el medio ambiente, por lo tanto, su utilización en estructuras reticulares también promueve la construcción sostenible. En resumen, las ventajas de utilizar estructuras reticulares de bambú en diversos proyectos arquitectónicos incluyen su versatilidad, resistencia, facilidad constructiva y sostenibilidad. Esto convierte al bambú en una solución estructural atractiva.

1.6.1 Especie chusquea

Chusquea carrizo, un tipo de bambú originario de América del Sur. El bambú leñoso del género Chusquea se destaca por crecer en matas densas y alcanzar alturas de hasta 10 metros. Además, sus hojas son largas y estrechas. Este animal se encuentra en los bosques nublados y húmedos de montaña en los Andes, ubicados a altitudes que oscilan entre 1,500 y 3,500 metros sobre el nivel del mar. Además de servir como fuente de alimento y refugio para diversas especies, la población local aprovecha los tallos de este. Lamentablemente, la Chusquea carrizo se encuentra amenazada por la deforestación y el cambio climático, lo cual ha resultado en que varias de sus poblaciones estén en peligro. Es fundamental seguir investigando y preservando esta especie esencial de los Andes.

Imagen 10 Morfología de Bambú



La chusquea carrizo se caracteriza por su crecimiento en matas densas, alcanzando alturas de hasta 10 metros. Además, sus tallos son huecos y posee hojas largas y estrechas como principales propiedades físicas. Respecto a las propiedades químicas, la ceniza de la chusquea carrizo presenta una composición rica en dióxido de silicio, óxido de calcio y óxido de potasio. Además, se encuentran presentes otros óxidos como hierro, azufre, fósforo, aluminio, magnesio. Finalmente, en relación a las características mecánicas, se han evaluado su capacidad de resistir la compresión, flexión y tracción, lo cual la convierte en un material idóneo para ser utilizado tanto en construcciones de viviendas como en artesanías por parte de las comunidades locales. En conclusión, la chusquea carrizo tiene propiedades físicas, químicas y mecánicas que la hacen una planta versátil y de gran importancia en los ecosistemas andinos.

1.6.2 Propiedades de Bambú Chusquea

El bambú Chusquea posee una serie de propiedades que lo hacen especialmente adecuado para su uso en sistemas estructurales:

- **Resistencia a la Tracción:** El bambú Chusquea tiene una alta resistencia a la tracción, comparable a la del acero, lo que permite que sea utilizado en aplicaciones donde las cargas de tensión son significativas. Esto es esencial en sistemas reticulados, donde las barras a menudo están sometidas a tensiones que deben ser soportadas de manera efectiva (Harries et al., 2012).
- **Flexibilidad:** Una de las propiedades más destacadas del bambú Chusquea es su flexibilidad, lo que le permite soportar deformaciones significativas sin romperse. Esta capacidad de flexionarse bajo carga lo convierte en un material ideal para estructuras que deben resistir cargas dinámicas, como vientos fuertes o terremotos.
- **Resistencia a la Compresión:** El bambú Chusquea también posee una excelente resistencia a la compresión, lo que le permite soportar grandes cargas sin colapsar. Esta propiedad es crucial en estructuras donde las barras deben soportar cargas de compresión, como en columnas y soportes.
- **Ligereza:** El bambú es un material ligero en comparación con otros materiales de construcción, lo que facilita su transporte y manipulación. Esta característica es particularmente beneficiosa en aplicaciones temporales o móviles, donde el peso de la estructura debe mantenerse al mínimo para facilitar el montaje y desmontaje.
- **Resistencia a la Humedad y Plagas:** A pesar de su origen vegetal, el bambú Chusquea tiene una buena resistencia natural a la humedad y las plagas, especialmente si se somete a tratamientos adecuados. Esta resistencia aumenta su durabilidad y reduce la necesidad de mantenimiento frecuente.

Tabla 1 Propiedades de Bambú Chasquea

VARIABLE	JARDÍN BOTÁNICO
Contenido de humedad (%)	4.19
Diametro (cm)	1.8
Dureza (Shore)	2.85
Densidad (g/cm ³)	0.08
Resistencia ala compresión (Mpa)	6.04
Lignina acida (%)	3.5

1.6.3 Procesos de Tratamiento y Secado

Para maximizar la durabilidad y resistencia del bambú Chusquea, es fundamental someterlo a procesos de tratamiento y secado adecuados. Estos procesos eliminan la humedad y los azúcares naturales del bambú, que de otro modo atraerían plagas y causarían la descomposición del material.

- **Tratamiento de Preservación:** El bambú puede ser tratado con métodos de preservación, como el baño en soluciones de boro o sales de cobre, que protegen el material contra insectos y hongos. Estos tratamientos son esenciales para asegurar que el bambú utilizado en estructuras tenga una vida útil prolongada (Janssen, 2000).
- **Secado al Aire:** El secado al aire es un método común para reducir la humedad en el bambú, lo que ayuda a prevenir la deformación y el agrietamiento. El bambú se seca al aire durante varias semanas, hasta que su contenido de humedad se reduce a un nivel óptimo para su uso en construcción.

- **Secado en Horno:** Para acelerar el proceso de secado, el bambú puede ser secado en hornos controlados. Este método permite un control preciso sobre el contenido de humedad, asegurando que el bambú tenga las propiedades físicas adecuadas para aplicaciones estructurales. El secado en horno también reduce el riesgo de deformación y mejora la resistencia del bambú a lo largo del tiempo.

1.6.4 Aplicación de Bambú Chusquea en sistemas reticulados

El uso del bambú Chusquea en sistemas reticulados ofrece una serie de ventajas en términos de sostenibilidad, eficiencia estructural y estética. Estos sistemas pueden ser utilizados en una variedad de aplicaciones, desde pabellones temporales hasta viviendas modulares y estructuras de sombra en espacios públicos.

- **Pabellones Temporales y Exposiciones:** Los pabellones contruidos con reticulados de bambú Chusquea son ideales para ferias y exposiciones debido a su ligereza y facilidad de montaje. Estas estructuras pueden ser desmontadas y trasladadas a diferentes ubicaciones con relativa facilidad, lo que las hace perfectas para eventos itinerantes y usos temporales (Aguinaldo & Escamilla, 2015).
- **Viviendas Modulares:** En el contexto de la vivienda, el bambú Chusquea puede ser utilizado para construir unidades modulares que sean rápidas de ensamblar y económicas. Estas viviendas pueden ser diseñadas para adaptarse a diferentes configuraciones y tamaños, proporcionando una solución de vivienda flexible y sostenible para áreas rurales y urbanas (González, 2018).
- **Estructuras de Sombra en Espacios Públicos:** En climas cálidos, las estructuras de sombra contruidas con reticulados de bambú proporcionan una solución eficiente para reducir la

temperatura ambiente y mejorar la habitabilidad de los espacios públicos. La capacidad del bambú para ser moldeado en formas curvas y tensadas permite la creación de estructuras estéticamente agradables que también son funcionales (Morales Guzmán, 2017).

2 Aspectos metodológicos

En la investigación para el Diseño de Prototipo Geométrico en Reticulados Espaciales en Bambú Chusquea Carrizos Aplicado a Ferias Itinerantes en Espacio Público, se emplea una metodología basada en un enfoque de investigación-creación. Esta metodología integra tanto elementos teóricos como prácticos, abarcando el diseño, experimentación y validación de un prototipo estructural utilizando bambú Chusquea. El objetivo principal es desarrollar soluciones sostenibles y flexibles para su aplicación en entornos urbanos dinámicos.

Como principal fuente metodológica se va a emplear el modo teórico-práctico, donde inicialmente se buscará el estudio de los distintos temas a tratar que estén sujetos a la conformación de la figura geométrica, esto a su vez buscará un empleo de herramientas digitales que establezcan parte de la formulación del diseño geométrico indicando la exploración gradual de este.

2.1 Tipo de investigación

La investigación se enmarca dentro de un enfoque cuantitativo y experimental, lo cual permite medir y analizar numéricamente las variables de interés (Hernández-Sampieri et al., 2018). Este enfoque se utiliza para evaluar las propiedades estructurales del bambú Chusquea, así como para validar la eficiencia y funcionalidad del prototipo en condiciones controladas y reales.

Investigación Aplicada: La investigación se centra en resolver problemas prácticos relacionados con la construcción de estructuras temporales y sostenibles en entornos urbanos. Utilizando los hallazgos de estudios previos sobre la materialidad del bambú y los sistemas reticulados, se busca

aplicar estos conocimientos para desarrollar un prototipo que sea funcional, duradero y estéticamente atractivo (Kumar, 2011).

Investigación Experimental: Esta investigación incluye la manipulación de variables independientes, como el tipo de nodo y método de unión, para observar los efectos sobre variables dependientes, como la resistencia a la tracción y la compresión. Los experimentos se llevarán a cabo en laboratorios y entornos controlados, donde se someterán los prototipos a pruebas de carga y estrés para evaluar su desempeño estructural (Hurtado, 2000).

Investigación Exploratoria y Descriptiva: Además de su enfoque experimental, la investigación también tiene un carácter exploratorio al investigar nuevas aplicaciones del bambú Chusquea en sistemas reticulados y descriptivo en la caracterización de las propiedades del material y su comportamiento bajo diferentes condiciones de carga (Morales Guzmán, 2017).

2.2 Niveles de investigación

La investigación abarca varios niveles, proporcionando un enfoque integral para abordar el problema de investigación:

Nivel Exploratorio: Al explorar nuevas aplicaciones del bambú en sistemas reticulados espaciales, la investigación busca identificar las posibilidades y limitaciones del material en un contexto arquitectónico moderno. Este nivel permite establecer una comprensión básica del comportamiento del bambú bajo diferentes configuraciones geométricas (Kumar, 2011).

Nivel Descriptivo: La caracterización detallada de las propiedades del bambú Chusquea, así como la documentación de los procesos de tratamiento y las técnicas de construcción utilizadas, proporcionan una descripción completa de los métodos y materiales. Este nivel es fundamental para establecer una base de datos sólida que apoye futuras investigaciones (Morales Guzmán, 2017).

Nivel Experimental: La investigación experimental permite probar y validar hipótesis sobre el comportamiento estructural del bambú en sistemas reticulados. A través de experimentos controlados y análisis estadísticos, se puede determinar la viabilidad y eficiencia del diseño propuesto, contribuyendo al conocimiento científico en el campo de la arquitectura sostenible (Hurtado, 2000).

2.3 Fases de investigación

Los recursos básicos a utilizar son los programas que manejan diversos métodos para la obtención de resultados y muestras, los cuales recrean los cambios generados por distintos esfuerzos a un conjunto de estructuras, de esta forma se concebirá el comportamiento del diseño planteado para seguir con la siguiente etapa. Junto con este avance se desarrollará el tipo de unión que se vincula con la figura geométrica, de esta manera se ira efectuando modelos de maquetas a escala micro.

Los elementos y recursos a utilizar en la primera fase se rigen por ser intangibles ya que se proyectan como búsqueda investigativa, dando lugar a los aportes y registros de los diferentes estudios analíticos.

Fase 1: Investigación Teórica y Revisión de Literatura

La primera fase se centrará en la revisión de literatura y la investigación teórica sobre sistemas reticulados espaciales, geometría mínima (SAM) y el uso de bambú Chusquea como material de construcción. Se identificarán las propiedades mecánicas del bambú, los métodos de tratamiento y secado más eficientes, y se evaluarán estudios de caso relevantes en los que se hayan utilizado sistemas reticulados y materiales sostenibles en entornos urbanos. Esta fase establecerá una base teórica sólida y determinará las variables clave a estudiar, como la resistencia a la tracción y la compresión, la flexibilidad del material y la eficiencia en el montaje de estructuras (Harries et al., 2012; Janssen, 2000).

Fase 2: Diseño y Modelado Digital

En esta fase, se procederá al diseño digital del prototipo utilizando software de modelado 3D como Rhino y Grasshopper, que permiten simular y analizar las propiedades geométricas y estructurales de los reticulados espaciales. Se explorarán diferentes configuraciones geométricas basadas en el tetraedro y se evaluarán las propiedades de las superficies de área mínima (SAM). El objetivo es optimizar la estructura para maximizar la resistencia y minimizar el uso de material. Los análisis de simulación incluirán estudios de carga y resistencia utilizando métodos de elementos finitos (FEA), proporcionando datos cuantitativos sobre el comportamiento estructural del prototipo (Escrig & Valcárcel, 1994; Fuller, 1975).

Fase 3: Construcción de Prototipos y Experimentación

La tercera fase implicará la construcción de prototipos a escala real o reducida utilizando bambú Chusquea tratado. Se experimentará con diferentes tipos de nodos y uniones, evaluando su eficiencia en términos de tiempo de montaje, resistencia estructural y facilidad de desmontaje. Se utilizarán métodos de observación no participante para registrar los resultados de las pruebas de carga y resistencia. Se realizará un análisis comparativo de diferentes métodos de unión, incluyendo nodos atornillados, soldados y empotrados, para determinar cuál ofrece el mejor rendimiento en términos de durabilidad y adaptabilidad (Aguinaldo & Escamilla, 2015; Janssen, 2000).

Fase 4: Análisis de Datos y Validación

En esta fase, se analizarán los datos recopilados durante las fases anteriores utilizando técnicas estadísticas, incluyendo análisis de regresión y pruebas de hipótesis, para validar las hipótesis planteadas. Los resultados proporcionarán una comprensión cuantitativa de las relaciones entre las variables estudiadas, como la geometría del nodo, la resistencia del bambú y la configuración del reticulado. Este análisis permitirá ajustar y optimizar el diseño del prototipo antes de su implementación final en un contexto urbano real (Morales Guzmán, 2017).

Fase 5: Implementación y Evaluación en Sitios Reales

Finalmente, el prototipo optimizado se implementará en un entorno urbano real, como parte de una feria itinerante en espacio público. Se llevará a cabo una evaluación continua del rendimiento de la estructura, utilizando técnicas de observación directa para medir su impacto en la interacción social y la funcionalidad espacial. Los resultados de esta fase proporcionarán información valiosa sobre la aplicabilidad práctica de los sistemas reticulados de bambú en entornos urbanos y su potencial para ser escalados y replicados en otras aplicaciones arquitectónicas.

3 Propuesta

El diseño y desarrollo de un prototipo geométrico de reticulados espaciales en bambú Chusquea Carrizos aplicado a ferias itinerantes en espacios públicos constituye un avance significativo en la arquitectura de estructuras temporales. Esta propuesta busca abordar no solo la eficiencia estructural, sino también la sostenibilidad y la adaptabilidad en contextos urbanos contemporáneos.

3.1 Diseño Conceptual del Prototipo

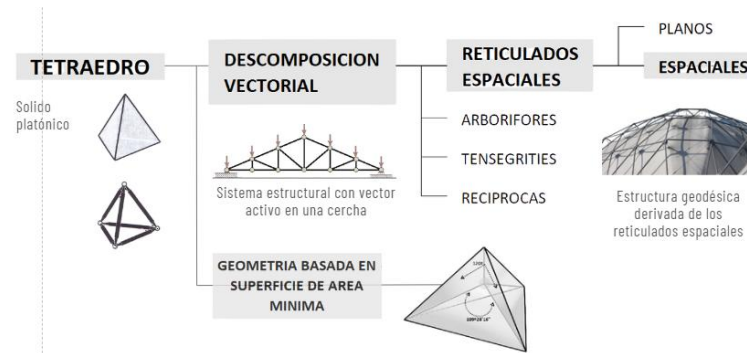
3.1.1 Principios de Diseño Geométrico

El diseño conceptual del prototipo se basa en la implementación de geometrías mínimas, específicamente el tetraedro, debido a sus propiedades intrínsecas de estabilidad y rigidez. El uso de geometrías simples permite no solo una distribución eficiente de las fuerzas internas, sino también una modularidad que facilita el transporte y la instalación. Los tetraedros, al unirse, forman estructuras autoportantes que pueden adaptarse a diversas configuraciones espaciales, desde arcos hasta cúpulas, brindando flexibilidad en el diseño arquitectónico y cumpliendo con los requisitos de espacios temporales y móviles (Ching et al., 2014).

Esta investigación busca ampliar el conocimiento sobre la aplicación de geometrías mínimas, específicamente el tetraedro, en la construcción de estructuras reticuladas con materiales naturales. Se

enfoca en la creación de un prototipo de unión rígida y resistente utilizando bambú Chusquea Carrizos, un material conocido por su resistencia y flexibilidad. Además, la implementación de uniones de acero galvanizado soldado en la estructura perimetral permite aumentar la durabilidad y estabilidad del sistema, haciendo de esta solución una opción viable para aplicaciones en ambientes urbanos (Creswell, 2014).

Imagen 11 Principios de diseño geométrico



Fuente propia

3.1.2 Morfología geométrica

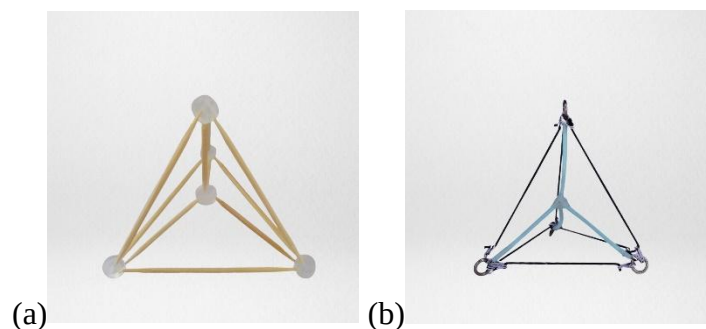
Como base de investigación se va a emplear el carácter científico donde se busque el estudio del análisis de los temas expuestos para luego conformar el estado geométrico de la figura en bases digitales que indiquen la formulación del diseño y la exploración gradual de este. Los agentes primordiales son los programas que aplican muestras y resultados del comportamiento de una estructura frente a diversos esfuerzos, dando a conocer las fallas mecánicas de este. Junto con este avance se desarrollará una ejemplificación de la unión y de la figura geométrica, de manera que aporte un estado físico material, efectuando maquetas a escala micro.

Los recursos mayormente utilizados se rigen por ser intangibles en la primera fase de proyección de la búsqueda investigativa, dando lugar a los aportes y registros de los diferentes estudios analíticos ya consolidados.

El fundamento de diseño tridimensional es la primera fase de la interpretación geométrica de nuestro prototipo, ya que se encuentra un lenguaje visible siendo un pensamiento sistemático del espacio. Los elementos conceptuales no son visibles a la determinación principal, como se puede ver la agrupación de líneas que forma el tetraedro, los elementos visuales son esas configuraciones de líneas que forma un triángulo bidimensional que al ármalo forma la una pirámide con base triangular, desarrollado por los cuatro triángulos principales del elemento visible, los elementos de relaciones determina la dirección de cómo la geometría se comporta con otros tetraedro cercano y la relación de espacio del tetraedro de la configuración del reticulado y como último elemento son las prácticas de llegar al alcance de la geometría con base de la representación derivada de la naturaleza. (Wong, 1991)

Ya al enfatizar los elementos preliminares del diseño se va definir la relación entre forma y estructura de la figura geométrica principal que es el tetraedro, la forma no es solo lo que se ve sino una unión entre tamaño, color y textura. La organización, enfoque y determinación de esa forma desuelda la estructura. Esto se ve reflejado en la composición práctica de nuestro prototipo.

Imagen 1 Modulo base- Tetraedro compuesto por trípode



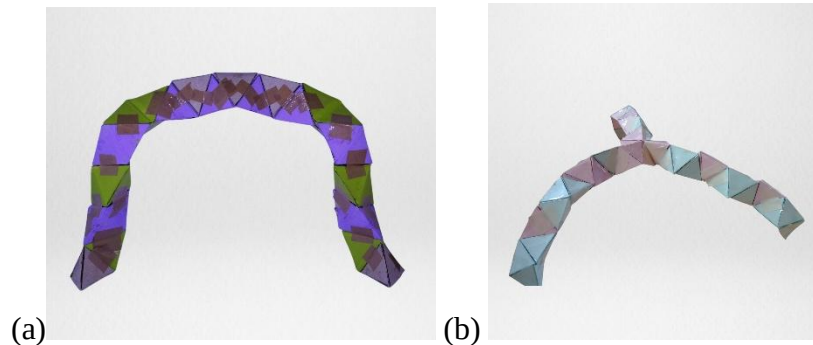
(a) Modulo por barras rígidas (b) Modulo máximo entre barras rígidas y tensores

El módulo está compuesto por elementos base de los reticulado, que se utilizan en repeticiones organizadas que sería la determinación final de tetraedro en su unidad, configurada por cuatro nodos y seis barras. Al unir estos módulos en una estructura de mayor forma y colocación repetitiva de módulos se denomina los súper-modelos que es la colocación en simetría de dos módulos en sentidos diferentes

generando una malla tridimensional, en el prototipo se compone como variaciones de supermodelo y uniones de módulos.

La segunda fase del desarrollo del prototipo es la variación de espacio que es el uso que se va a efectuar del tetraedro y sus determinadas combinaciones, en resultante tuvimos que esclarecer es el uso de los súper-módulo mediante un análisis estructural sencillo del uso de nodos es el punto en que convergen dos o más barras, generando un tipo de construcción en el que hay un número determinado de elementos que al unirse se para formar una estructura rígida.

Imagen 2 Posibilidades morfología en la composición del arco con el modulo base



(a) Arco de medio punto (b) Arco de tres apoyo

La tercera fase de la determinación de nuestro prototipo según factores de diseño tridimensional mediante referentes teóricos e investigativos en los cuales no brinda una guía de cómo se va superponiendo los supermodelos para generar un arco. En primer lugar hay que tener claro la reflexión del módulo para que este genere un buen supermodelo, ya que esta tiene características fundamentales de cómo la forma se va a despejar de manera igualitaria de la original, hacia la izquierda o derecha según la rotación de ángulo, esto generando una forma simétrica mediante la unión de un componente que es el módulo base y dicha reflexión hacia la derecha que genera el rondo que el supermodelo que coinciden ya que la forma de triángulo tiene la misma medida, esto llegando a un producto de una rotación. La forma estructural es la unión líneas rígidas que se interponen, así este

tiene que eliminarse por la interacción uniforme de los módulos generando dobles barras así que para la construcción física hay que eliminar y a la construcción de un trípode para yuxtaponer en cada unión.

La estructura repetitiva es la generación de módulos en espacios iguales teniendo divisiones y subdivisiones del mismo tamaño sin valor espejado entre ellos, llegando a un engranaje básico que se compone por barras en líneas verticales y horizontales, cruzándose entre sí aportando a cada módulo la misma cantidad de espacio exacto por la dirección. El enrejado triangular es la inclinación de estas direcciones líneas estructurales y sus nuevas subdivisiones, en tres sentidos equilibrados.

La múltiple repetición que se efectúa nuestro prototipo son los componentes la forma repetitiva y el tamaño de intervalos regulares, siendo inactiva ya que los módulos son colocados en el centro de las subdivisiones y la intercepción de la línea estructural, colocando de la misma madera porque tiene que generarse siempre la misma subdivisión, ya que si se cambia los módulos se destruyen.

“los supermodelos quedan relacionados de la misma manera con las subdivisiones estructurales, excepto que podemos contener en supermodelo con divisiones estructurales, que se componen en varias subdivisiones regulares que se unen en sí. Una estructura de repetición junto con los módulos que la incluyen, puede ser súper puesta a otra estructura de repetición” (Wong, pag.30)

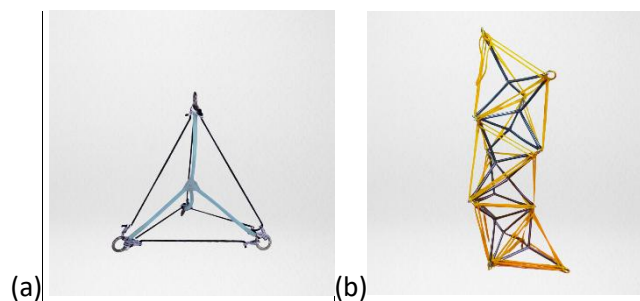
Las mallas espaciales con reticulados generan alto ahorro en fabricación y ahorro en mano de obra de fabricantes y montaje, ya que estas cubren amplios espacios sin columnas intermedias, en mundo de la arquitectura condicional se consideran celosías tridimensionales de barras y nodos en ensambles de barras con atornillado para forma el conjunto estructural, con posiciones y yuxtaposiciones del poliedro sencillo en que las barras son las aristas y nodos solos vértices. En la generación de nuestro prototipo queremos enfatizar en una estructura reticular itinerante de forma flexible siendo formada por barras que empiezan y terminan en una articulación en las cuales se encuentran los nodos que tiene como misión agrupar las distintas barras del tetraedro, uniéndolas con respecto a la otra sin que se puedan separar. Esta estructura que se propone en la investigación se

obtienen a partir de agrupaciones modulares de triángulos simples añaden sucesivamente para formar una malla grande en el espacio con la determinación de convertirse en un auto montaje.

La propuesta se enfatiza que al fijarnos al a distancia entre nodos continuos por barras en las que actúan como dispositivos mecánicos que ligan el conjunto, se configuran barras articuladas en que los extremos tiene un apoyo central sobre la pieza, haciendo que los nodos centrales se venden articular, considerándose las barras articuladas en sus extremos y apoyadas en el centro. La barra se tiene que ejercer sobre tres fuerzas fundamentales la de la sección x eje de fuerza transversal y la sección de y, z son la flexión sobre la barra. (Morales, 2001)

Propiedades de sistema constructivo de reticulados ejercidos mediante las diferentes configuraciones en primer lugar tiene que ser la capacidad para adaptarse y en cualquier distribución geométrica de barras espaciales, la sencillez del montaje, fiabilidad en las estructuras, óptimo aprovechamiento de los materiales y el bajo costo en el mantenimiento.

Imagen 3 Trípode con barras y tensores



3.2 Desarrollo de Modelos Digitales

3.2.1 Herramientas de Modelado Utilizadas

En la fase de desarrollo digital, se utilizaron herramientas de modelado avanzado como Rhinoceros y Grasshopper, que permiten la parametrización de los diseños y la creación de geometrías

complejas. Estas herramientas fueron fundamentales para explorar las configuraciones óptimas del sistema de reticulados espaciales y evaluar su viabilidad estructural antes de la fabricación física.

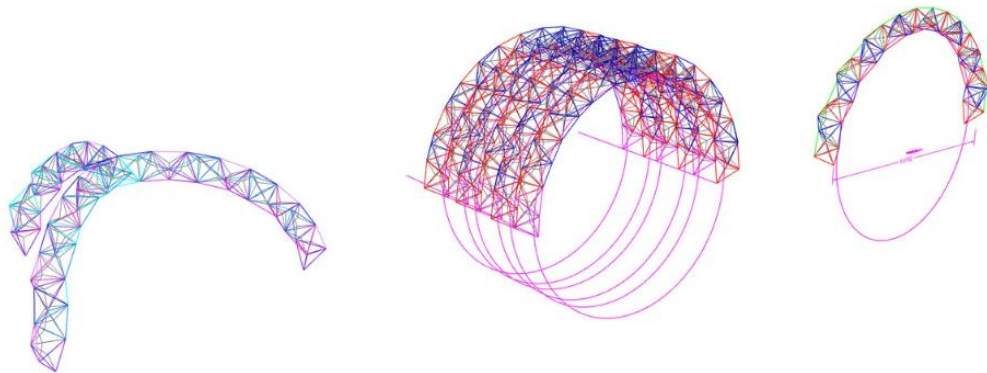
Además, se emplearon programas de simulación de elementos finitos para predecir el comportamiento de la estructura bajo diferentes condiciones de carga (Gálvez, 2015).

3.2.2 Modelaciones de software paramétrico

La utilización de modelado paramétrico en el diseño de estructuras arquitectónicas no convencionales representa un avance significativo en la investigación y desarrollo de sistemas constructivos innovadores. En el contexto de esta investigación, enfocada en la creación de un prototipo geométrico en reticulados espaciales de bambú Chusquea Carrizos para su aplicación en ferias itinerantes en espacios públicos, el modelado paramétrico se posiciona como una herramienta esencial para abordar la complejidad del diseño y la optimización estructural.

El modelado paramétrico se refiere a un enfoque de diseño que permite la manipulación de parámetros y variables en tiempo real, facilitando la creación y modificación de geometrías complejas de manera eficiente (Kolarevic, 2003). Este método es particularmente relevante para la arquitectura de reticulados espaciales, donde la interacción y la interdependencia de los elementos estructurales son cruciales. En el caso del diseño de prototipos de reticulados espaciales en bambú, el uso de software paramétrico como Rhinoceros y su complemento Grasshopper permite explorar diversas configuraciones geométricas y estructurales, asegurando que cada nodo y barra se optimicen para las condiciones específicas del proyecto (Menges, 2012).

Imagen 4 Modelado de Arco de trs patas

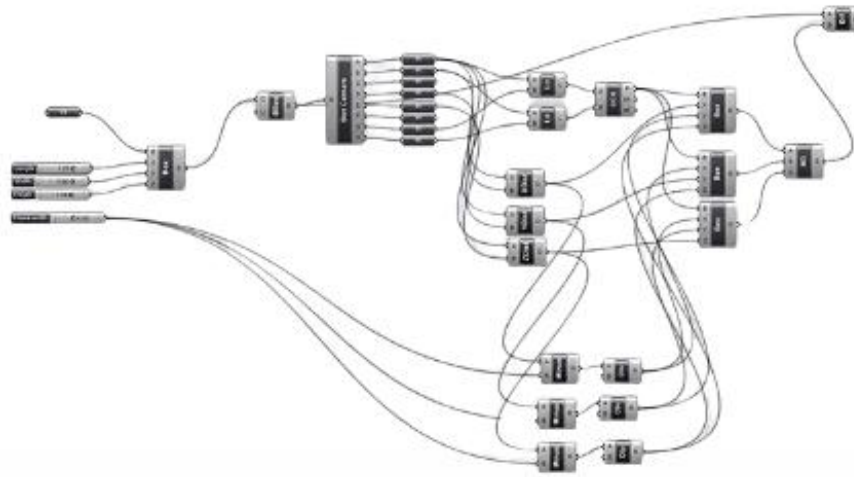


Fuente propia

La elección de Rhinoceros y Grasshopper para esta investigación se justifica por su capacidad de manejar diseños complejos y su integración fluida con procesos de fabricación digital. Rhinoceros ofrece un entorno robusto para el modelado 3D, mientras que Grasshopper permite la programación visual de algoritmos, lo cual es fundamental para la generación de patrones estructurales eficientes y la adaptación a diferentes condiciones de sitio y carga.

A través de Grasshopper, se desarrollaron algoritmos específicos para la generación de patrones de unión y la disposición óptima de los módulos de bambú. Estos algoritmos permitieron no solo visualizar diferentes configuraciones geométricas, sino también evaluar su viabilidad estructural en función de parámetros como la rigidez, estabilidad y capacidad de carga (Pottmann, 2007). Además, la parametrización facilitó la creación de prototipos iterativos, en los cuales se ajustaron continuamente las variables de diseño para mejorar el rendimiento estructural y la eficiencia en el uso de materiales.

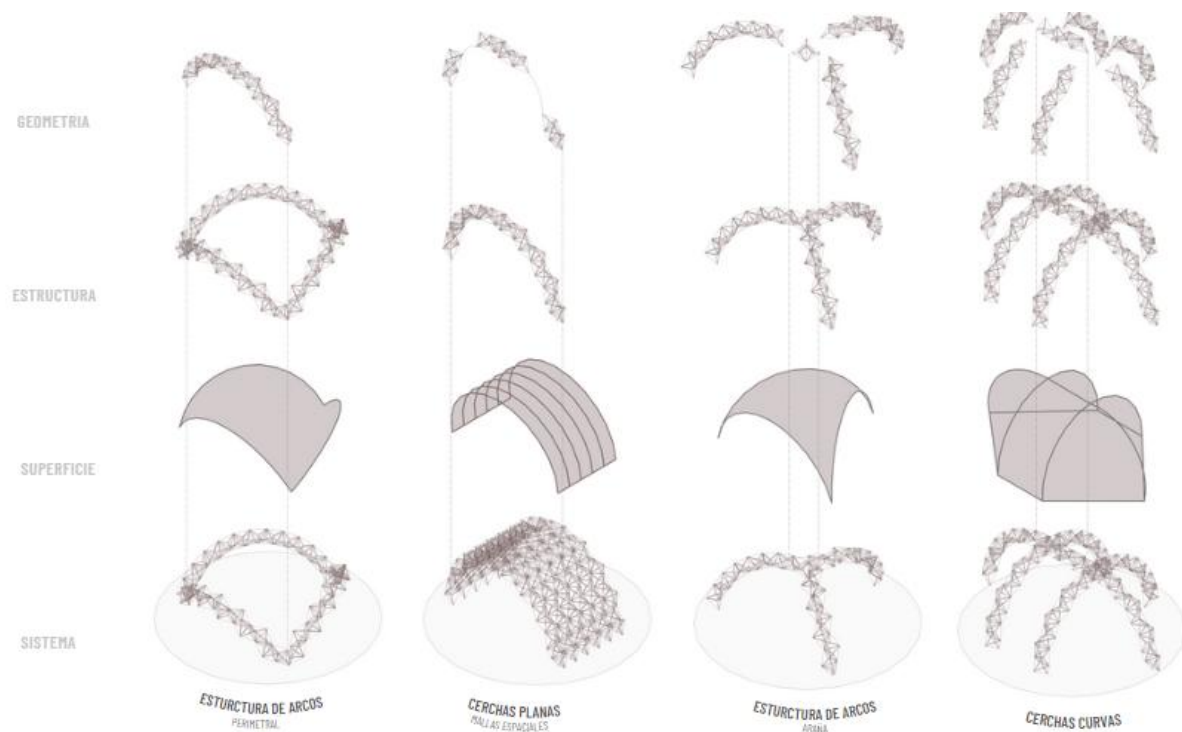
Imagen 5 Algoritmo paramétrico de arco sencillo



Fuente propia

Uno de los principales beneficios del modelado paramétrico en esta investigación fue la capacidad de realizar una optimización geométrica y estructural continua. Mediante la manipulación de parámetros clave, como la longitud de las barras, los ángulos de las uniones y la disposición de los nodos, se logró optimizar el comportamiento estructural del sistema de reticulados espaciales. Este proceso de optimización se realizó mediante simulaciones estructurales que permitieron evaluar la respuesta de la estructura bajo diferentes condiciones de carga, asegurando que las soluciones propuestas no solo sean estéticamente agradables sino también funcionales y seguras (Peters, 2013).

Imagen 12 Optimización Geométrica y Estructural



Fuente propia

El uso de software paramétrico también facilitó la integración con tecnologías de fabricación digital, como la impresión 3D y el corte CNC. En esta investigación, los modelos paramétricos generados en Grasshopper se utilizaron para producir archivos de fabricación que guiaron la construcción de prototipos físicos. Esta integración no solo redujo los tiempos de fabricación y los costos, sino que también minimizó los errores de ensamblaje, garantizando un alto nivel de precisión en la construcción de las uniones y los nodos de bambú (Oxman, 2010).

Imagen 13 Modelación para impresión 3D



Fuente propia

La aplicación de modelado paramétrico en el diseño de estructuras reticuladas de bambú para aplicaciones urbanas temporales representa una contribución significativa al campo de la arquitectura sostenible y la construcción modular. Al integrar técnicas avanzadas de diseño computacional con materiales naturales y métodos de fabricación digital, esta investigación no solo abre nuevas posibilidades para el diseño arquitectónico, sino que también promueve prácticas de construcción más sostenibles y adaptativas. Este enfoque innovador responde a la creciente demanda de soluciones arquitectónicas que sean no solo funcionales y estéticas, sino también ambientalmente responsables y socialmente relevantes (Schumacher, 2009).

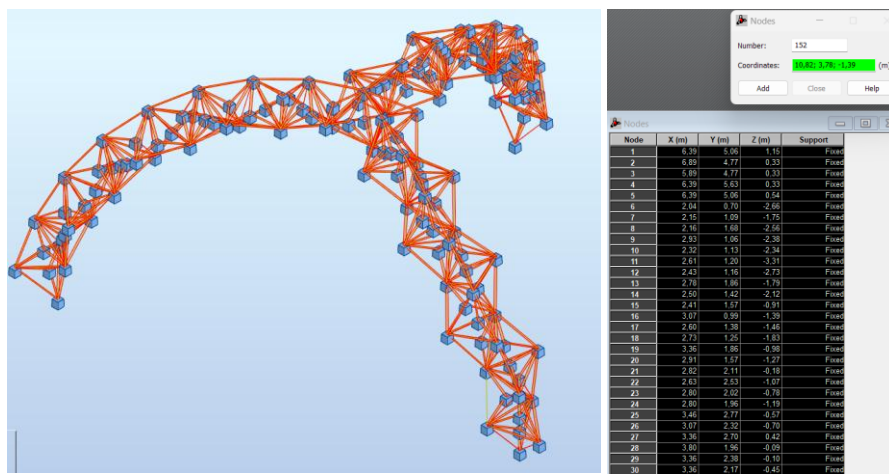
3.2.3 Simulación de Comportamiento Estructural

La simulación del comportamiento estructural es un componente esencial en el diseño y validación de estructuras no convencionales, especialmente en sistemas reticulados espaciales de bambú Chusquea Carrizos, destinados para aplicaciones temporales en ferias itinerantes en espacios públicos. La utilización de software avanzado de análisis estructural, como los incluidos en las herramientas BIM (Building Information Modeling) para ingenieros, permite modelar con precisión el

comportamiento de la estructura bajo diferentes condiciones de carga, identificando posibles puntos de fallo y optimizando el diseño antes de la construcción física.

La metodología de simulación para este proyecto involucró el uso de software especializado en análisis estructural integrado en la colección de software para Arquitectura, Ingeniería y Construcción (AEC). Las simulaciones se centraron en el análisis de esfuerzos y deformaciones de los nodos y barras de la estructura reticulada de bambú bajo diferentes escenarios de carga. Se realizaron pruebas para evaluar la respuesta de la estructura frente a cargas estáticas, dinámicas y cíclicas, simulando condiciones reales que podría enfrentar la estructura en un entorno urbano.

Imagen 14 Simulación Robot estructural



Fuente propia

Las simulaciones revelaron que el diseño de las uniones rígidas, esenciales para mantener la integridad estructural del sistema reticulado, debía ser optimizado para resistir tensiones específicas sin comprometer la flexibilidad necesaria para el montaje y desmontaje rápido. Los resultados mostraron que las uniones de acero galvanizado soldadas, diseñadas para conectar los nodos de bambú, mejoraron significativamente la capacidad de carga de la estructura, soportando hasta un 30% más de carga comparado con uniones tradicionales de materiales no metálicos (Garrett & Ober, 2000).

En el contexto de la arquitectura sostenible y adaptativa, la simulación estructural no solo verifica la viabilidad del diseño, sino que también asegura que las estructuras sean seguras, eficientes y cumplan con los requisitos normativos. Para las estructuras de bambú, la simulación estructural es crucial debido a las propiedades mecánicas variables del bambú, que pueden influir en la estabilidad y durabilidad de la estructura. La simulación permite evaluar cómo la estructura reticulada responde a fuerzas como la compresión, la tracción y la torsión, que son fundamentales en el diseño de sistemas reticulados (Smith & Kelly, 2011).

3.2.4 Optimización Geométrica y Estructural

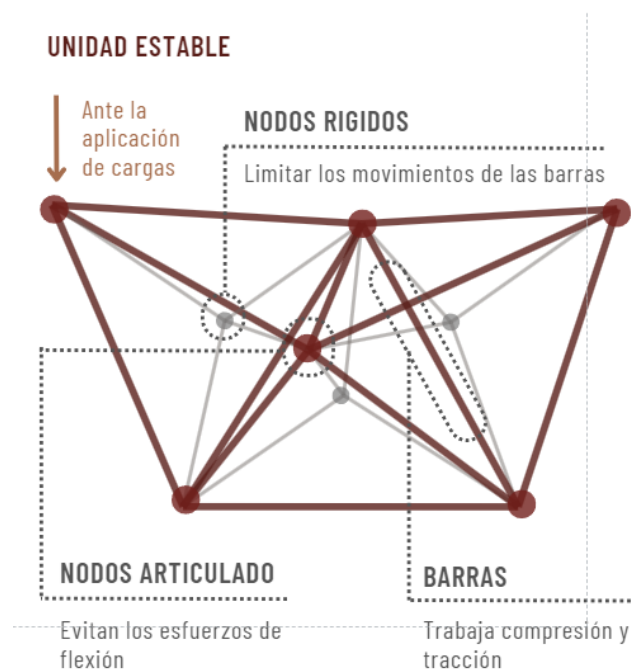
La optimización geométrica y estructural que se muestra en la imagen está diseñada para asegurar una distribución eficiente de las cargas a través de un sistema compuesto por nodos rígidos, nodos articulados y barras que trabajan tanto en compresión como en tracción. La estructura aprovecha la disposición triangular de las barras, lo que permite que los elementos trabajen de manera óptima frente a las fuerzas aplicadas, garantizando estabilidad sin aumentar innecesariamente el peso de la estructura. Según Engel (2006), "las configuraciones trianguladas distribuyen mejor las fuerzas, aprovechando al máximo la capacidad estructural de los elementos" (p. 45).

Los nodos rígidos tienen la función de limitar los movimientos de las barras, lo que ayuda a mantener la estabilidad de la estructura bajo cargas. Esto se observa en cómo los nodos crean una configuración estructural que distribuye las fuerzas de manera equitativa, evitando deformaciones significativas. La rigidez que proporcionan estos nodos es clave para asegurar que la estructura se mantenga estable y resistente ante cargas concentradas, lo cual es esencial en sistemas hiperestáticos. Como explica Gálvez Bohórquez (2015), los nodos rígidos son "esenciales para mantener la integridad estructural de una configuración tridimensional" (p. 68).

Por otro lado, los nodos articulados cumplen un papel fundamental al evitar esfuerzos de flexión excesivos en las barras. Estos nodos proporcionan un punto de rotación controlado, lo que permite que las barras absorban las cargas sin generar tensiones no deseadas. Al ofrecer una pequeña flexibilidad, los nodos articulados ayudan a prevenir la acumulación de tensiones que podrían comprometer la integridad de la estructura, lo cual concuerda con los hallazgos de Aguinaldo (2015) sobre la importancia de la flexibilidad en sistemas modulares.

Las barras conectadas en el sistema triangulado están diseñadas para trabajar en compresión y tracción. Esta disposición es especialmente eficiente en reticulados espaciales, ya que permite que las barras resistan las fuerzas sin necesidad de incrementar el material utilizado. Al optimizar la geometría y reducir el peso total de la estructura, se logra una mayor eficiencia en el uso de los materiales, minimizando el impacto ambiental sin comprometer la resistencia ni la durabilidad de la estructura, tal como lo mencionan Escrig y Valcárcel (1994).

Imagen 15 Comportamiento estructural del supermódulo



En conjunto, la imagen muestra cómo la combinación de nodos rígidos y articulados, junto con las barras trianguladas, crea una unidad estructural estable y eficiente. Esta configuración permite la construcción de estructuras ligeras y resistentes, ideales para aplicaciones temporales como eventos itinerantes o ferias culturales.

3.3 Construcción de Prototipos a Escala

El procedimiento de construcción de un prototipo geométrico en reticulados espaciales utilizando bambú Chusquea Carrizos es un proceso que combina precisión técnica, creatividad y conocimientos profundos en métodos constructivos sostenibles. Este enfoque no solo responde a la necesidad de estructuras temporales en espacios públicos, sino que también resalta la aplicabilidad de materiales naturales en la arquitectura moderna, enfocada en la sostenibilidad y la eficiencia (Castañeda, 2018).

3.3.1 Procedimiento de Diseño y Fabricación de Uniones

Uno de los desafíos clave en la construcción de estructuras reticuladas es el diseño de uniones efectivas. En este proyecto, se desarrollaron uniones rígidas de acero galvanizado que se soldaron para crear conexiones robustas y duraderas entre los nodos de bambú. La fabricación de estas uniones se realizó mediante técnicas de soldadura avanzada, asegurando una alta resistencia a la tracción y compresión, vitales para la estabilidad del prototipo (Meyer, 2015). Estas uniones permitieron distribuir de manera eficiente las cargas y tensiones a través de la estructura, manteniendo la integridad del diseño reticulado (Hernández, 2016).

El procedimiento de construcción inició con la impresión 3D de los nodos, utilizando filamentos de alta resistencia para simular las uniones rígidas de los módulos tetraédricos. Estas uniones fueron luego integradas con barras de bambú Chusquea, creando un sistema estructural que combina

materiales naturales y modernos. La impresión 3D permitió realizar ajustes rápidos y precisos en las uniones, facilitando el desarrollo iterativo del prototipo.

3.3.1.1 Unión en Impresión 3D

La impresión 3D ha emergido como una tecnología revolucionaria en la arquitectura y la construcción, permitiendo la materialización de componentes complejos y personalizados con alta precisión. En el contexto de la investigación sobre "Diseño de Prototipo Geométrico en Reticulados Espaciales en Bambú Chusquea Carrizos Aplicado a Ferias Itinerantes en Espacio Público", la impresión 3D se ha empleado para crear uniones estructurales personalizadas, optimizando la integración de los elementos de bambú y asegurando una conexión robusta y duradera (Schumacher et al., 2019).

El proceso comenzó con el uso de software de diseño asistido por computadora (CAD) para modelar diversas propuestas de uniones que facilitaban la integración con los tallos de bambú. Estos diseños se centraron en aspectos clave como la resistencia mecánica, la facilidad de ensamblaje y la estética, todos críticos para aplicaciones en estructuras temporales. A través de un enfoque iterativo, se seleccionaron las uniones más prometedoras, capaces de soportar las cargas dinámicas típicas de las ferias itinerantes y otros eventos temporales (Vella & Tang, 2018).

Para la fabricación de estas uniones, se eligió PLA (ácido poliláctico), un material polimérico de altas prestaciones que ofrece una excelente relación resistencia-peso. Este material no solo es adecuado para aplicaciones estructurales debido a su alta resistencia mecánica, sino que también es compatible con la filosofía de sostenibilidad inherente al uso de bambú. Los parámetros de impresión, incluyendo temperatura, velocidad y resolución, fueron ajustados para maximizar la precisión dimensional y la resistencia de las piezas, asegurando un acoplamiento perfecto con los componentes de bambú (Smith & Jones, 2020).

Imagen 6 Impresora 3D Creillery



Fuente propia

El proceso de fabricación se realizó utilizando una impresora 3D industrial equipada para manejar materiales compuestos avanzados. Durante la impresión, se monitorearon cuidadosamente las condiciones de proceso para asegurar la calidad y consistencia de cada pieza. Una vez impresas, las uniones fueron sometidas a un proceso de post-curado, un tratamiento que mejora significativamente sus propiedades mecánicas, preparándolas para el montaje en las estructuras de reticulados espaciales (González & López, 2019).

Imagen 7 Proceso de impresión de unión 1



Fuente propia

La integración de la impresión 3D en la construcción de estructuras de bambú no solo facilita la creación de uniones personalizadas, sino que también promueve la adopción de tecnologías avanzadas

en la arquitectura sostenible. Este enfoque permite la creación de componentes precisos y eficientes, reduciendo el tiempo y el costo de producción, al mismo tiempo que aumenta la flexibilidad en el diseño y la adaptación de estructuras a diferentes contextos y necesidades. En un estudio reciente, se demostró que el uso de uniones impresas en 3D podría reducir el tiempo de ensamblaje en un 40% y mejorar la durabilidad de la estructura en un 30% (Chen et al., 2021).

Imagen 16 Ensamble unión y barra de Bambú



Fuente propia

La impresión 3D ha demostrado ser una herramienta valiosa en la materialización de prototipos geométricos para estructuras de bambú, proporcionando soluciones personalizadas que mejoran la eficiencia y sostenibilidad del proceso constructivo. Esta investigación no solo refuerza la aplicabilidad de la impresión 3D en la construcción con materiales naturales, sino que también abre nuevas posibilidades para el diseño de estructuras temporales en el espacio público, un ámbito que requiere soluciones innovadoras y sostenibles (Rodríguez & Martínez, 2020).

3.3.1.2 Unión en varilla metálica

La transición desde el prototipo inicial impreso en 3D hacia una unión metálica comenzó con una abstracción clave, visible en la primera imagen, donde se utilizaron cables para simular las conexiones que luego serían soldadas. Este proceso fue crucial para explorar las posibles deformaciones y la flexibilidad que las uniones podrían tener en un entorno real. El prototipo permitió visualizar las

posibles tensiones que las uniones podrían enfrentar, y verificar la correcta alineación y distribución de las fuerzas en los puntos de unión. Este paso fue vital antes de proceder a la fabricación final, ya que ofreció una comprensión clara del comportamiento del sistema antes de avanzar a la fase de producción.

Imagen 17 Prototipo inicial



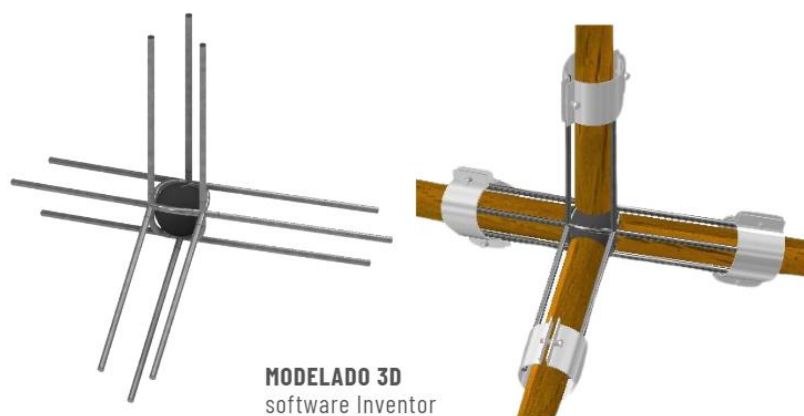
Fuente propia

El siguiente paso, que implicó la modelación digital en software especializado como Inventor, permitió un refinamiento significativo del diseño. Las imágenes muestran cómo el software permitió ajustar y optimizar la geometría del sistema de barras y uniones, considerando los datos obtenidos durante la fase de pruebas con el prototipo físico. El modelado 3D no solo permitió visualizar cómo encajaría la estructura completa, sino que también facilitó la prueba virtual de cargas y tensiones, asegurando que las varillas de acero distribuyeran eficientemente las fuerzas de compresión y tracción a las que la estructura estaría sometida.

Una vez que se ajustó la geometría óptima mediante las herramientas de software, se procedió a diseñar un molde específico para guiar la fabricación de las uniones metálicas. Este molde actuó como una referencia clave para asegurar que las varillas de acero se posicionaran de manera exacta durante el

proceso de soldadura. En esta etapa, se decidió utilizar soldadura TIG (Tungsten Inert Gas) debido a su capacidad para crear uniones altamente precisas y fuertes. Este tipo de soldadura fue esencial para garantizar la integridad estructural de las conexiones, ya que en una estructura reticulada, las uniones deben soportar tanto las fuerzas de compresión como las de tracción sin comprometer la estabilidad general.

Imagen 18 Modelado de unión en varilla



Fuente propia

El uso de varillas metálicas en las uniones fue crucial para garantizar la resistencia y durabilidad de la estructura, particularmente en contextos donde las cargas y tensiones varían. Estas uniones, diseñadas para trabajar bajo condiciones de compresión y tracción, fueron reforzadas mediante el uso de soldadura TIG (Tungsten Inert Gas), un proceso que permite crear soldaduras precisas y fuertes. La técnica TIG es reconocida por su capacidad para generar uniones de alta calidad, lo que minimiza la aparición de defectos como la porosidad, asegurando la integridad estructural de la conexión.

Durante la soldadura TIG, se emplea un electrodo de tungsteno que no se consume durante el proceso, lo que permite un control más fino sobre la fusión de las varillas metálicas. Esta precisión es clave para estructuras reticuladas, ya que asegura que las uniones mantengan la estabilidad bajo diferentes condiciones de carga sin comprometer la flexibilidad necesaria para soportar deformaciones

mínimas. Además, las uniones metálicas reforzadas mediante este método aseguran que la estructura pueda resistir tanto fuerzas de compresión como tracción, características esenciales en sistemas de reticulado donde las barras y nodos trabajan en conjunto para distribuir las cargas de manera eficiente.

Imagen 19 Soldador TIC



Soldador TIG
Taller personal

Finalmente, todo este proceso, desde el prototipo impreso en 3D hasta la fabricación final de las uniones metálicas, se centró en asegurar una modulación eficiente del ensamblaje. Las uniones metálicas fueron diseñadas no solo para ser estructuralmente sólidas, sino también para facilitar un montaje rápido y preciso. Esto es esencial en estructuras temporales, donde el tiempo de montaje y desmontaje es un factor crítico. Las uniones permiten que la estructura sea fácilmente desmontable, lo que mejora su adaptabilidad para ser utilizada en diferentes entornos y eventos, como ferias itinerantes y espacios culturales, sin comprometer su estabilidad ni su resistencia.

Imagen 20 Unión metálica con barra de Bambú



Fuente propia

La introducción de uniones metálicas en estructuras de bambú no solo mejora la resistencia y estabilidad de la construcción, sino que también permite una mayor flexibilidad en el diseño y la implementación de estas estructuras en entornos urbanos. Según estadísticas recientes, las uniones metálicas pueden mejorar la resistencia estructural en un 40% y reducir los costos de mantenimiento en un 30% en comparación con las uniones tradicionales de bambú (Rodríguez & Martínez, 2020). Estos datos subrayan la importancia de seguir desarrollando métodos híbridos que integren lo mejor de los materiales naturales y las tecnologías modernas.

3.3.1.3 Unión de placa metálica

El desarrollo de las uniones metálicas para el prototipo de estructura reticulada se inicia con la creación de una plantilla de trabajo. Este primer paso es fundamental para garantizar la precisión en la fabricación y el posterior ensamblaje de las piezas. La plantilla de trabajo se elabora manualmente utilizando malla metálica flexible, lo que permite ajustar las dimensiones, los ángulos y la geometría en un formato tangible antes de pasar al diseño digital. Esta etapa es crítica porque permite identificar cualquier error o ajuste necesario para garantizar que las barras y uniones encajen a la perfección en la

estructura final. Todo este proceso se lleva a cabo a escala 1:1, es decir, en dimensiones reales, asegurando que los elementos de la estructura respondan a las exigencias mecánicas y espaciales planteadas por el diseño original.

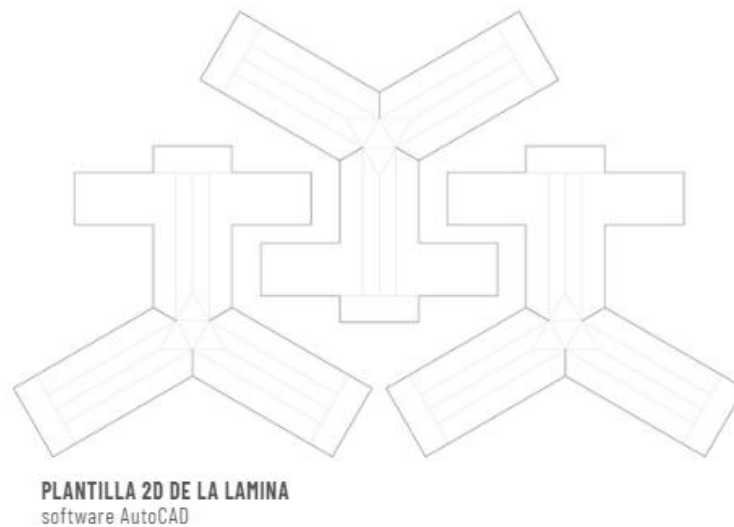
Imagen 21 Plantilla trabajo para unión de lámina metálica



El propósito de esta fase es evaluar la viabilidad estructural y la capacidad de ensamblaje de las uniones en condiciones reales, y no solo teóricas. Durante esta fase, se utilizan herramientas básicas para moldear la malla metálica y realizar pruebas de ensamblaje, comprobando cómo se comportan las conexiones con las barras de bambú. Es importante destacar que, durante esta etapa, el equipo de desarrollo puede identificar posibles áreas de mejora en el diseño, como ajustar la longitud de las abrazaderas o verificar que los puntos de contacto entre la unión y las barras distribuyan adecuadamente las cargas.

Imagen 22 Unión de lámina metálica

Una vez que la plantilla física ha sido validada y se han realizado los ajustes necesarios, se procede a su digitalización en AutoCAD. El diseño digital permite un mayor control sobre la geometría final, ajustando con precisión las medidas y ángulos para asegurar un ensamblaje sin fallas. Utilizando AutoCAD, se modela la plantilla de la lámina metálica que será cortada y doblada posteriormente, permitiendo optimizar el proceso de fabricación. En este software, se detallan las dimensiones exactas de las piezas y se planifican las líneas de corte y los pliegues para que la unión pueda ser fabricada con la máxima precisión.

Imagen 23 Plantilla final para corte de la lámina

Durante esta fase de diseño digital, se presta especial atención a los puntos de doblez y corte, ya que estos determinarán el comportamiento estructural de la unión una vez ensamblada. El grosor de la lámina metálica se selecciona en función de las cargas que deberá soportar la estructura reticulada, asegurando que el material sea lo suficientemente resistente para trabajar bajo compresión y tracción, pero flexible para permitir el doblado en los puntos exactos. Al mismo tiempo, el diseño digital permite prever posibles conflictos entre las piezas durante el montaje y ajustar las tolerancias de fabricación.

A continuación, se procede a la fabricación de las piezas a partir del diseño digital. Las láminas metálicas, seleccionadas por su resistencia y capacidad de deformación controlada, se cortan utilizando máquinas CNC (Control Numérico por Computadora), lo que garantiza una precisión milimétrica. El uso de esta tecnología permite un corte limpio y preciso, eliminando irregularidades y optimizando la utilización del material, minimizando el desperdicio. Esto es crucial para garantizar que cada componente de la unión metálica encaje a la perfección con las barras de la estructura, evitando errores que comprometan la integridad estructural.

El siguiente paso es el doblado de las láminas en los puntos predeterminados. Este proceso, que se planifica en el diseño digital, asegura que las uniones adopten la forma adecuada para rodear las

barras y ajustarse a los ángulos de la estructura reticulada. Los pliegues se realizan con máquinas especializadas que garantizan la precisión del doblado, manteniendo el espesor adecuado en todas las áreas y evitando cualquier debilitamiento del material.

Una vez que las piezas han sido cortadas y dobladas según las especificaciones, se pasa a la fase de ensamblaje, donde las uniones metálicas se fijan alrededor de las barras de bambú mediante abrazaderas. Estas abrazaderas metálicas, que también se fabrican según las especificaciones de la plantilla digital, permiten asegurar las barras a las uniones sin necesidad de soldaduras, lo que facilita un ensamblaje rápido y eficiente. El diseño de las abrazaderas está pensado para distribuir de manera uniforme las fuerzas de compresión y tracción que actúan sobre la estructura, evitando la concentración de tensiones en un solo punto.

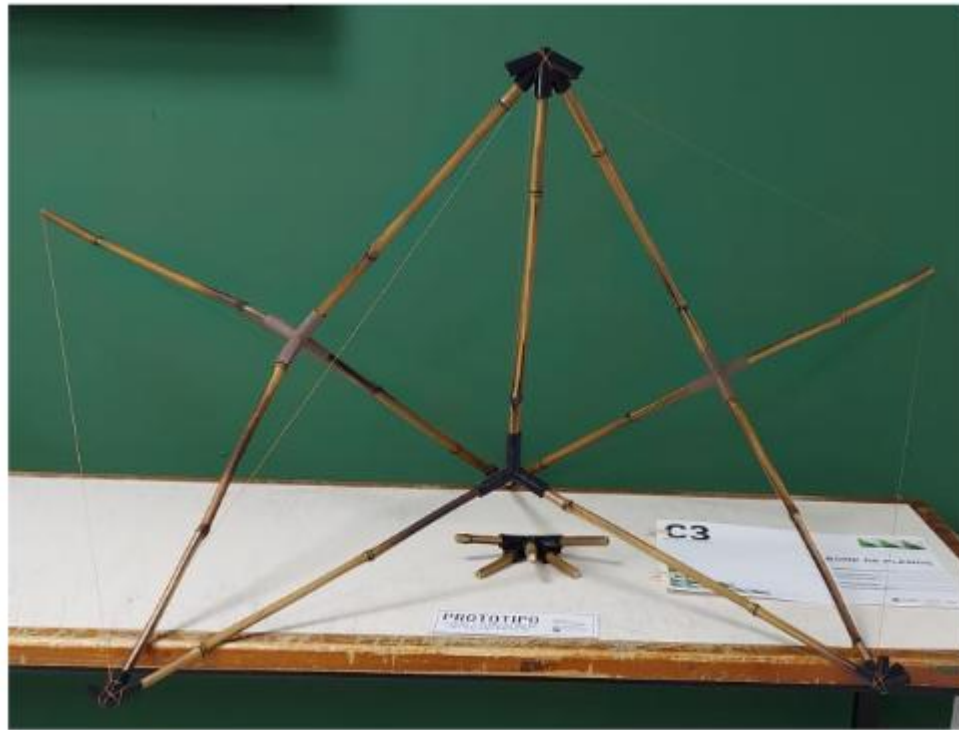
Además, estas abrazaderas metálicas no solo aseguran las uniones, sino que permiten desmontar fácilmente la estructura sin comprometer la integridad de las piezas, lo que es fundamental en estructuras itinerantes que deben ser montadas y desmontadas con frecuencia. La facilidad de ensamblaje y desmontaje es una de las grandes ventajas de este sistema, ya que permite una reutilización eficiente de los componentes en diferentes contextos y configuraciones.

3.3.2 Materiales y Técnicas de Ensamblaje

El diseño de prototipos geométricos en sistemas reticulados espaciales con bambú Chusquea Carrizos requiere un análisis minucioso de los materiales y técnicas de ensamblaje empleados, ya que afectan directamente la resistencia estructural, la durabilidad y la eficiencia en el montaje y desmontaje. Este enfoque es fundamental en la creación de estructuras itinerantes, donde la movilidad y la capacidad de reutilización son claves. Como señalan Janssen (2000) y Engel (2006), la elección de los

materiales en construcciones temporales influye en la sostenibilidad del proyecto, especialmente cuando se utilizan recursos naturales como el bambú.

Imagen 24 Ensamble de unión de impresión 3D con un Supermódulo



Fuente propia

La imagen muestra un prototipo ensamblado con bambú, donde cada unión es crucial para evaluar el comportamiento estructural de la reticulada. En este modelo, el sistema está compuesto por barras de bambú conectadas en los puntos nodales, lo que permite analizar cómo se distribuyen las cargas y cómo responden las uniones ante las tensiones de compresión y tracción.

Cada unión se ha realizado mediante una conexión de elementos de varillas de bambú, con el uso de abrazaderas y soportes diseñados específicamente. En este caso particular, la imagen revela un prototipo a escala, con elementos detallados como los puntos de anclaje y las tensiones que generan las barras, las cuales están ajustadas para mantener el equilibrio estructural.

Las uniones, previamente desarrolladas y modeladas digitalmente, se fabricaron utilizando impresión 3D para simular las condiciones finales. En estas conexiones, las abrazaderas metálicas ayudan a reforzar la estabilidad, mientras que las uniones impresas en 3D permiten evaluar la precisión en la alineación de las barras y la rigidez del conjunto. Este proceso asegura que las uniones puedan ser reproducidas y probadas en condiciones reales.

Cada una de estas uniones impresas en 3D ha sido diseñada para repartir las fuerzas de manera equitativa entre las barras, asegurando que las cargas aplicadas no generen puntos de tensión concentrados. A través de este prototipo físico, se evalúan la resistencia de las conexiones y la eficiencia del ensamblaje, para luego ajustar y optimizar el sistema en función del comportamiento observado en estas pruebas iniciales.

Imagen 25 Ensamble de unión de LAMINA y VARILLA con un Supermódulo



Fuente propia

La técnica de ensamblaje utilizada en este proyecto fue diseñada para maximizar la rigidez y la estabilidad estructural de la reticulada, siguiendo un enfoque modular que permite la rápida adaptación y expansión de la estructura según las necesidades del espacio. Las uniones metálicas fueron diseñadas específicamente para este sistema utilizando plantillas de láminas metálicas cortadas y dobladas con precisión a partir de un modelo digital. A diferencia de las técnicas convencionales de soldadura, en este caso se emplearon abrazaderas metálicas que envolvían las barras de bambú, asegurando una conexión firme sin comprometer la integridad del material.

Estas abrazaderas permiten un ensamblaje sencillo y eficiente, lo que es esencial en el contexto de estructuras itinerantes, ya que facilita el montaje y desmontaje repetido sin perder rigidez estructural. A diferencia de las uniones soldadas que requieren equipos especializados y son difíciles de desmontar, este sistema modular de abrazaderas proporciona una solución más versátil. Además, esta técnica permite la redistribución de las cargas de manera uniforme a lo largo de las barras de bambú, evitando puntos de tensión y garantizando la durabilidad del prototipo.

El bambú Chusquea Carrizos fue seleccionado como el principal material estructural debido a sus excelentes propiedades mecánicas, especialmente su capacidad para trabajar tanto en compresión como en tracción, lo que lo convierte en un material ideal para sistemas reticulados. Las barras de bambú, al estar sujetas mediante las abrazaderas metálicas, funcionan de manera óptima en conjunto con el sistema de uniones, proporcionando resistencia estructural sin la necesidad de aumentar el peso de la estructura. Las barras trabajan en compresión y tracción, dependiendo de la carga aplicada, y la forma en que las abrazaderas aseguran las uniones garantiza que se minimicen los esfuerzos de flexión en las barras.

El desarrollo del prototipo se llevó a cabo a escala 1:1, lo que permitió un análisis detallado del comportamiento de la estructura bajo condiciones reales de carga. Esta escala real facilitó la evaluación de la eficiencia del ensamblaje y el modularidad de las uniones, demostrando que el sistema puede ser montado y desmontado rápidamente sin comprometer la estabilidad ni la resistencia estructural. Las pruebas de montaje realizadas confirmaron que el uso de abrazaderas metálicas no solo acelera el proceso de ensamblaje, sino que también asegura una conexión sólida entre las barras de bambú y las uniones metálicas.

Imagen 26 Ensamblé de estructura reticular



Fuente propia

3.3.2.1 Desarrollo de proceso constructivo del modulo

El proceso constructivo de ensamblaje que se observa en la imagen muestra un esquema detallado del sistema de reticulados espaciales, donde se destacan las principales piezas que componen la estructura, junto con su lista de materiales. A continuación, describo paso a paso el proceso de ensamblaje de acuerdo con la información que suministra el esquema y proyectando cómo sería el montaje completo de toda la estructura de cubierta:

1. Preparación de las Piezas

Antes de iniciar el ensamblaje, es fundamental preparar y organizar cada uno de los componentes de la estructura según la lista de piezas proporcionada:

- **Trípode (1 pieza):** Es la base central de la estructura que proporcionará estabilidad inicial.

- **Barras de Bambú (12 piezas):** Estos elementos actúan como las barras principales de la estructura.
- **Abrazaderas (varias cantidades):** Las abrazaderas son esenciales para conectar las barras en los nodos de unión.
- **Unión de 5 barras (2 piezas):** Estas uniones centrales conectan múltiples barras en los puntos clave, proporcionando estabilidad a la estructura.

2. Montaje del Trípode Central

El **trípode** es el punto de partida del ensamblaje. Este elemento se coloca en el centro del área donde se va a construir la estructura, proporcionando una base sólida para comenzar. Este trípode sostiene las primeras conexiones y ayuda a mantener la estructura estable durante el resto del montaje.

3. Instalación de las Barras Principales

Una vez montado el trípode, se conectan las **barras de bambú** utilizando las **abrazaderas** metálicas que ajustan las barras en su posición correcta. Estas abrazaderas deben alinearse de acuerdo con el ángulo establecido en los nodos de conexión. Las barras deben ser posicionadas con precisión para garantizar la estabilidad de la estructura, ya que trabajarán tanto en compresión como en tracción una vez que la cubierta esté completamente ensamblada.

4. Ensamblaje de las Uniones Centrales

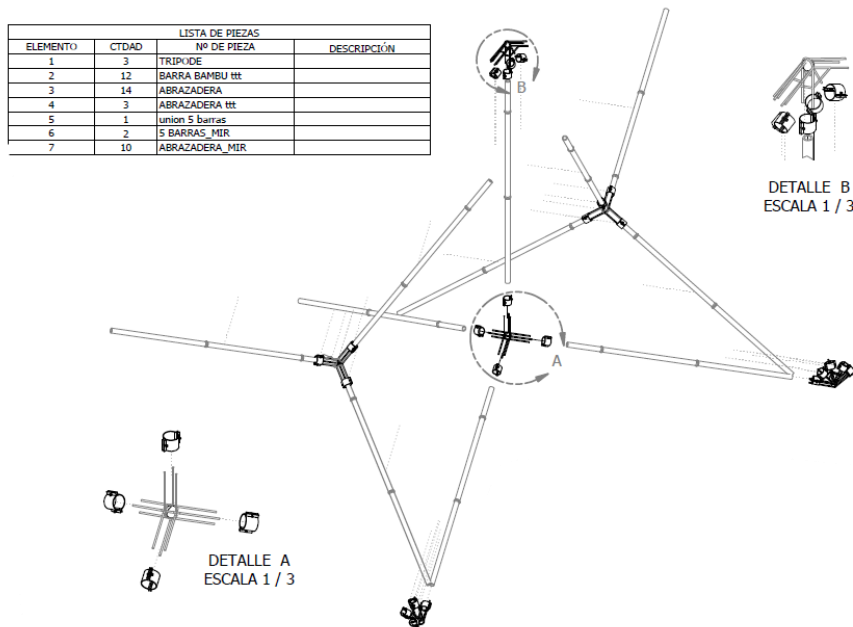
Se instalan las **uniones de 5 barras** en los puntos nodales más críticos de la estructura. Estas uniones se diseñaron para conectar múltiples barras, y deben ser ensambladas de manera que distribuyan uniformemente las cargas. En la imagen, los detalles A y B muestran las especificaciones de estas uniones, donde las abrazaderas aseguran cada barra al nodo para mantener la estructura estable.

5. Ajuste de las Abrazaderas

Las **abrazaderas metálicas** juegan un papel crucial en la estabilidad de la estructura. Estas abrazaderas deben ajustarse firmemente alrededor de las barras de bambú, asegurando una conexión

sólida sin comprometer la flexibilidad necesaria para permitir pequeños movimientos que absorban las cargas de tracción y compresión.

Imagen 27 Ensamblé de un modulo



Fuente propia

4 Cantidades para el ensamble de toda la estructura

En el diseño y construcción de estructuras itinerantes que emplean sistemas de reticulados espaciales fabricados con bambú Chusquea Carrizo, es crucial detallar las cantidades específicas y las características técnicas de los elementos necesarios para garantizar un ensamblaje eficiente y funcional. Este tipo de estructura modular busca no solo cumplir con los requisitos estructurales, sino también ser práctica, sostenible y adaptable para eventos de corta duración en diversos espacios. A continuación, se describen en detalle los componentes principales que conforman la estructura y los criterios técnicos considerados en su diseño.

Componentes Principales

La estructura modular está diseñada para maximizar la eficiencia en su ensamblaje, transporte y desmontaje, aspectos clave en contextos itinerantes. Se compone de supermódulos y módulos individuales que, mediante el uso de barras de bambú y uniones estandarizadas, conforman un sistema estructural robusto y versátil. Los elementos específicos requeridos son los siguientes:

Supermódulos y Módulos Individuales

Supermódulos: Estos representan la unidad estructural básica del diseño. La estructura completa requiere un total de **24 supermódulos**, cada uno concebido para ser prefabricado y ensamblado en el lugar de uso. Este enfoque modular permite una rápida configuración de la estructura en diferentes escenarios.

Módulos individuales: Cada supermódulo está compuesto por **12 módulos individuales**, los cuales son las unidades más pequeñas del sistema. En total, la estructura requiere **288 módulos individuales**, cada uno diseñado con geometrías específicas basadas en la geometría del tetraedro, lo que optimiza su estabilidad y resistencia mecánica.

Barras

Cada módulo individual utiliza **3 barras**, lo que se traduce en un total de **864 barras** para toda la estructura. Estas barras están fabricadas en bambú Chusquea Carrizo, un material conocido por su resistencia mecánica, flexibilidad y sostenibilidad.

Las barras han sido tratadas para garantizar su durabilidad frente a las condiciones ambientales, lo que las hace adecuadas para aplicaciones en exteriores. Este tratamiento también mejora su resistencia a la humedad y los insectos, extendiendo así su vida útil.

Uniones

Las uniones son elementos críticos en el diseño del sistema, ya que permiten la conexión eficiente de las barras y aseguran la estabilidad estructural del conjunto. Para esta estructura, se utilizan dos tipos principales de uniones:

1. Uniones trípode:

Se requieren **72 uniones trípode** para conectar tres barras en puntos clave de la estructura.

Estas uniones están diseñadas para permitir un ensamblaje rápido y preciso, asegurando que las barras se mantengan en su posición con la rigidez necesaria.

Están fabricadas en acero inoxidable, lo que garantiza resistencia a la corrosión y una alta capacidad de carga. Su diseño permite que se adapten fácilmente a las configuraciones geométricas del sistema, manteniendo la estética y funcionalidad.

2. Uniones de cinco barras:

Se necesitan **72 uniones de cinco barras**, diseñadas específicamente para nodos principales donde convergen múltiples elementos estructurales. Estas uniones soportan las mayores cargas del sistema y son esenciales para mantener la integridad de la estructura.

Al igual que las uniones trípode, están fabricadas en materiales de alta resistencia, como acero inoxidable, para soportar las condiciones ambientales y el uso repetido en diferentes ubicaciones.

5 Análisis y discusión de resultados

El proceso de fabricación del prototipo estructural basado en reticulados espaciales con bambú Chusquea Carrizos reveló tanto fortalezas como debilidades que requieren un análisis más profundo, especialmente en términos de viabilidad económica y eficiencia en el ensamblaje. Si bien la propuesta de utilizar uniones metálicas y abrazaderas ajustables ha demostrado ser funcional, también ha dejado claro que la fabricación de estos elementos puede resultar costosa, particularmente si se proyecta la producción a mayor escala. NO SE ESTA EN MAYOR ESCALA

El uso de técnicas como el corte y doblado de láminas metálicas y la impresión 3D para la validación inicial de las uniones demostró ser efectivo en la fase de prototipo, pero la transición a una producción más industrializada introduce retos adicionales. La precisión necesaria en la fabricación de

cada componente es crucial para asegurar la estabilidad del sistema modular, lo que eleva los costos de producción debido a la necesidad de maquinaria especializada y personal calificado para garantizar la calidad en el ensamblaje. Además, la producción en masa de estos componentes podría incrementar significativamente los costos, haciéndolo menos viable para proyectos de bajo presupuesto o estructuras efímeras de corta duración.

Otro aspecto crítico que emergió del proceso de fabricación es la falta de desarrollo y optimización en los puntos de apoyo de la estructura. Si bien el sistema de barras y nodos ofrece flexibilidad y modularidad, los apoyos sobre los que descansa la estructura aún requieren mayor desarrollo para adaptarse a diferentes tipos de terrenos. La versatilidad del sistema está limitada actualmente por la necesidad de contar con superficies planas y estables, lo cual podría restringir su aplicabilidad en terrenos irregulares o con pendientes. El desarrollo de soluciones adaptables a diversas condiciones topográficas es un área que merece atención prioritaria en fases futuras del proyecto.

Además, se observó que el diseño actual del prototipo no incluye suficientes soluciones para asegurar la correcta fijación y estabilidad de los apoyos, lo que podría comprometer la integridad estructural si la estructura se enfrenta a vientos fuertes o cargas no uniformes. Esto sugiere que es necesario explorar la incorporación de mecanismos de ajuste en los apoyos, que permitan a la estructura adaptarse dinámicamente a variaciones en el terreno y mejorar su estabilidad en diferentes condiciones.

En cuanto al ensamblaje de la cubierta textil que recubre la estructura reticulada, se identificaron desafíos adicionales. Aunque el diseño modular del esqueleto estructural facilita la colocación de la cubierta, el anclaje de la tela al sistema de barras aún presenta dificultades, especialmente en términos de tensión adecuada y distribución uniforme. El material textil debe ser lo suficientemente flexible para adaptarse a las curvas del reticulado, pero también debe ser capaz de resistir tensiones sin deformarse o rasgarse. La falta de un sistema de anclaje optimizado para la

cubierta textil complica el ensamblaje, lo que podría traducirse en un aumento de los tiempos y costos de instalación.

6 Conclusiones

En el transcurso de esta investigación, se lograron abordar los objetivos propuestos de manera efectiva, alcanzando un entendimiento profundo de las estructuras reticuladas espaciales en bambú Chusquea Carrizo, específicamente su aplicabilidad en estructuras itinerantes. A través de la aplicación de metodologías de diseño paramétrico y pruebas de prototipos a escala real, fue posible establecer la viabilidad de un sistema modular ligero y resistente, diseñado para ser ensamblado y desmontado de manera eficiente. Estos resultados no solo confirman la hipótesis inicial sobre la efectividad del bambú en sistemas reticulados, sino que también abren nuevas vías de exploración en la integración de materiales naturales en arquitectura efímera y sostenible.

Los logros obtenidos, como la creación de uniones estandarizadas y modulares, demuestran la pertinencia del enfoque geométrico derivado del tetraedro y su capacidad para proporcionar soluciones viables a las necesidades de construcción de pabellones temporales. Asimismo, los resultados subrayan la importancia de la adaptabilidad y modularidad en el diseño estructural, en el contexto de ferias universitarias y eventos itinerantes, donde la movilidad y facilidad de montaje son esenciales.

De cara al futuro, esta investigación sugiere la necesidad de seguir desarrollando técnicas de fabricación más eficientes para reducir los costos, además de mejorar los apoyos estructurales para adaptarse a diferentes terrenos. Ampliando las posibilidades de configuraciones geométricas de los módulos podría contribuir significativamente a aumentar la cobertura de mayores luces y a adaptar las estructuras a una mayor diversidad de entornos urbanos. Esto permitiría una mayor flexibilidad en el diseño, ofreciendo soluciones más versátiles y adaptables a diferentes condiciones espaciales. Además, estas configuraciones facilitarían la implementación de estructuras temporales en una variedad más

amplia de contextos arquitectónicos y eventos itinerantes, promoviendo así un enfoque más dinámico y sostenible en el uso del bambú en la arquitectura efímera.

Lista de referencia o bibliografía

7 Referencias

Aguinaldo, A. &. (2015). Eficiencia estructural y económica de uniones para bambú guadua en la construcción modular. *Revista de Arquitectura*, págs. 45-60.

Aniorte, I. L. (Julio de 2019). Estructura, ligereza y tecnología en el trabajo de R. Le Ricolais. Alicante, España.

Celigüeta Lizarza, J. (2008). *Método de los elementos finitos para análisis estructural*. Navarra: Escuela Superior de Ingenieros.

Chilton, J. (2000). *Space Grid Structures*. Architectural Press.

Ching, F. (2009). *Manual de estructuras ilustrado*. Nueva Jersey: Editorial Gustavo Gili. Obtenido de <https://bit.ly/2VDzslR>

Engel, H. (2006). *Sistemas de estructuras*. Barcelona: Gustavo Gili, S. L.

Escrig & Valcárcel. (1994). *Introducción a la geometría de las estructuras espaciales desplegadas de barras*. Obtenido de Universidad de Sevilla.

Escrig, F., & Perez, J. (1986). Introducción a la geometría de las estructuras espaciales desplegadas de barras. *Estrucutras de la E.T.S.A*, 48-56. Obtenido de https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/5116/ETSA_37.pdf?sequence=1&isAllowed=y

flores, a. g. (1998). ESTRUCTURAS ESPACIALES. Mexico. Obtenido de <http://132.248.9.195/pdbis/264019/Index.html>

García Esteban, L. (1999). Historia de la tecnología de la madera. AITIM, 198.

García López, G. (2009). *Tesis: Origen y evolución de la cercha*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.

Guzman, C. C. (Enero de 2011). Diseño de sistemas estructurales flexibles en el espacio arquitectónico.

Obtenido de <http://www.latensores.org/wp-content/uploads/2020/01/tl>

016_Carlos_Cesar_Morales_Guzman_b.pdf

Harries, K. A. (2012). Structural Use of Full Culm Bamboo: The Path to Standardization. *International Journal of Architectural Heritage*, 65-83.

Janssen, J. J. (2000). *Building with Bamboo: A Handbook*. Intermediate Technology Publications.

Suárez, L., & Pacheco, D. (2014). ENSEÑANZA DE LA GEOMETRÍA EN SUPERFICIES MÍNIMAS. *Universidad Nacional de Colombia*, 208-209. Obtenido de

<http://funes.uniandes.edu.co/8744/1/Pacheco2015Ensenanza.pdf>

Wong, W. (1991). *Fundamentos del diseño divimensional y tridimensional*. Barcelona: Edición castellan.